

Diego Andrés Gutiérrez Mendoza

**ANÁLISE EXERGÉTICA E AMBIENTAL DA PRODUÇÃO E
USO DE BIOGÁS PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-graduação de Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Santa Catarina
para a obtenção do Grau de mestre em
Engenharia Mecânica
Orientador: Prof. Dr. Edson Bazzo

Florianópolis
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Gutiérrez Mendoza, Diego Andrés
ANÁLISE EXERGÉTICA E AMBIENTAL DA PRODUÇÃO E USO DE
BIOGÁS PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA / Diego Andrés Gutiérrez
Mendoza ; orientador, Edson Bazzo - Florianópolis, SC, 2014.
69 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Geração de energia. 3.
Exergia. 4. Análise do ciclo de vida. 5. Biogás. I. Bazzo,
Edson. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Diego Andrés Gutiérrez Mendoza

ANÁLISE EXERGÉTICA E AMBIENTAL DA PRODUÇÃO E USO DE BIOGÁS PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 26 de setembro de 2014.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Prof. Edson Bazzo, Dr. Eng.
Orientador

Banca Examinadora:

Prof. Edson Bazzo, Dr. Eng.
Presidente

Prof. Sebastião Roberto Soares, Dr.

Prof. Paulo Belli Filho, Dr.

Prof. Vicente de Paulo Nicolau, Dr.

A meus pais.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Edson Bazzo, pela acolhida no LabCET - Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos.

Aos professores da POSMEC – UFSC que fizeram parte deste processo.

Aos membros da banca examinadora, pela disposição.

Aos demais colaboradores e funcionários da POSMEC-UFSC.

À CAPES, e FINEP pelo apoio econômico.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”

Albert Einstein

RESUMO

São apresentadas as análises exergética e ambiental considerando a produção de biogás a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) e seu uso para geração distribuída. O domínio do sistema completo inclui o transporte do RSU, os processos do aterro sanitário e a geração de eletricidade. Na análise foi considerado um aterro sanitário localizado no estado de Santa Catarina. O aterro sanitário recebe o RSU dos municípios de Itajaí e Balneário Camboriú, que representam uma população total de aproximadamente 300.000 habitantes. O aterro sanitário tem sete anos de serviço e atualmente o biogás é coletado e usado para gerar energia elétrica. Durante esse período tem-se acumulado o total de 650.000 t de RSU. A vazão volumétrica do biogás de aterro coletado é 435 Nm³/h. O inventário de entradas e saídas tanto de energia e materiais como de emissões de gases de efeito estufa (GEE) está baseado no levantamento de dados de campo, informação fornecida pelas empresas e documentação técnica. Os resultados da análise proposta também podem ser utilizados para comparar o impacto ambiental de diferentes sistemas de conversão e combustíveis, com a finalidade de identificar quais são os processos do sistema responsáveis pela maior destruição de exergia e maior impacto ambiental. Na análise exergética foi calculado que para fornecer 736 kWe à rede elétrica são necessários 55 kW dos quais 52,7 kW correspondem ao diesel utilizado no transporte e 2,3 ao gás liquefeito de petróleo (GLP) utilizado no aterro sanitário. Os resultados da análise ambiental, obtidos através da aplicação da técnica de avaliação do ciclo de vida (ACV), considerando a categoria de impacto mudança climática e usando o índice *Global Warming Potential* (GWP 100a), mostraram que por cada MWh de energia fornecida à rede, são emitidos 3.287 kg CO_{2-eq}, correspondendo 64,25% às fugas de biogás no aterro sanitário, 33,25% às emissões do motorizador e 2,50% ao transporte do RSU. Os resultados obtidos são importantes na tomada de decisões com o objetivo de atenuar a mudança climática reduzindo as emissões de GEE. Os resultados podem ser utilizados para comparar com a produção de eletricidade a partir da incineração direta dos RSU.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos. Biogás. Análise exergética. Avaliação de ciclo de vida. Emissões de gases de efeito estufa.

ABSTRACT

An exergy and environmental analysis is presented considering the landfill gas production from municipal solid waste (MSW) and its use for distributed generation. The domain of the entire system includes the transport of the MSW, the sanitary landfilling process and electricity generation. An existing sanitary landfill located in the state of Santa Catarina is considered for analysis. The sanitary landfill receives MSW from Itajaí and Balneário Camboriú, representing a total population of approximately 300,000 citizens. The sanitary landfill is about seven years old and now the biogas is collected for electricity generation. During this period a total of 650,000 t of MSW was accumulated. The mass flow rate of landfill gas is measured as 435 Nm³/h. The inventory of inputs and outputs of energy and materials, as well the greenhouse gases (GHG) releases are based on field measurements, provided information and technical documentation. The proposed analysis can be used to compare the environmental impact of different conversion systems and fuels, in order to identify which processes of the system are responsible for greater exergy destruction and environmental impacts. The exergy analysis reports a utilization of 55 kW for supplying 736 kWe to the electrical grid, 52,7 kW corresponding to the diesel used for the transport of the MSW and 2,3 kW to the liquefied petroleum gas (LPG) used in the landfill. The results of the environmental analysis, obtained by using the method of life cycle assessment (LCA), considering the climate change as impact category and using the Global Warming Potential (GWP) index, showed that for each MWh of energy provided to the grid, 3.287 kg CO_{2-eq} are released, 64,25% corresponding to biogas leakage on the landfill, 33,25% to motorgenerator releases and 2,50% to MSW transport. The found results are important to manage further decisions in order to attenuate the climate change by reducing the emissions of GHG. The results may be used to compare with electricity production from MSW direct incineration.

Keywords: Municipal solid waste, Landfill gas. Exergy analysis. Life cycle assessment. Greenhouse gas emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Identificação das fronteiras.	3
Figura 2 - Fluxograma de caracterização e classificação dos resíduos sólidos urbanos.	6
Figura 3 - Hierarquia dos resíduos sólidos.....	8
Figura 4 - Fases da avaliação de ciclo de vida.	12
Figura 5 - Estrutura metodológica para a análise exergética e ambiental.	16
Figura 6 - Etapas do processo de geração de energia a partir do biogás de aterro.	18
Figura 7 - Mapa da localização do aterro sanitário de Canhanduba e os municípios de Itajaí e Balneário Camboriú.....	19
Figura 8 - Foto aérea do aterro sanitário de Canhanduba.	19
Figura 9 - Instalação do processo de tratamento do biogás.....	21
Figura 10 - Esquema da planta de tratamento do biogás e motogerador.....	21
Figura 11 - Equipamentos do processo de tratamento do biogás.	23
Figura 12 - Motogerador Dresser-Rand.....	23
Figura 13 - Sistema completo, mostrando as etapas relativas ao transporte de RSU, produção de biogás e geração de eletricidade.	24
Figura 14 - Esquema representativo do Domínio 1, contemplando o transporte do resíduo sólido urbano e o processo de formação do biogás.	25
Figura 15 - Esquema representativo do Domínio 2, contemplando o tratamento do biogás e o uso do biogás no motogerador.	25
Figura 16 - Fluxos de exergia dos Domínios 1 e 2.	31
Figura 17 - Fluxos de exergia do sistema completo.....	32
Figura 18 - Fluxos de entradas e saídas de exergia consideradas para o motogerador.....	39
Figura 19 - Influência da eficiência exergética do motogerador na eletricidade produzida, exergia destruída no motogerador e exergia associada aos gases de exaustão.	40
Figura 20 - Diagrama de Sankey contabilizando a exergia destruída e os fluxos de exergia.....	42
Figura 21 - Influência da porcentagem de fugas de biogás no impacto ambiental total e devido às fugas.....	48
Figura 22 - Influência da eficiência exergética do motogerador no impacto ambiental.	48
Figura 23 - Esquema da proposta alternativa de substituição do <i>chiller</i> mecânico por um <i>chiller</i> de absorção.....	49
Figura 24 - Esquema da proposta alternativa de substituição do GLP por biogás na caldeira.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativa de composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008.	7
Tabela 2 - Composição típica do biogás de aterro e propriedades dos componentes.	9
Tabela 3 - Siloxanos lineares e cíclicos.	10
Tabela 4 - Inventário da Etapa 1: Transporte.	26
Tabela 5 - Inventário da Etapa 3: Geração de energia.	27
Tabela 6 - Composição do biogás do aterro sanitário de Canhanduba.	30
Tabela 7 - Consumos de exergia do Domínio 1.	38
Tabela 8 - Consumos de exergia do sistema completo.	40
Tabela 9 - Fração de exergia consumida por etapa.	40
Tabela 10 - Inventário do ciclo de vida para geração de 1 MWh.	44
Tabela 11 - Impacto ambiental por etapa na categoria de mudança climática. ..	44
Tabela 12 - Parâmetros atualizados ao substituir o <i>chiller</i> mecânico por um <i>chiller</i> de absorção	44
Tabela A.1 - Exergia química padrão e massa molecular dos componentes do biogás.	59
Tabela B.1 - Composição dos gases de exaustão.	61

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais
ACV	Avaliação do ciclo de vida
AICV	Avaliação do impacto de ciclo de vida
ESMAP	Energy Sector Management Assistance Programme
FINEP	Financiadora de estudos e projetos
GEE	Gases do efeito estufa
GLP	Gás liquefeito de petróleo
GWP	Global Warming Potential
ICV	Inventário de ciclo de vida
IEA	International Energy Agency
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
PCI	Poder calorífico inferior
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduo sólido urbano

NOMENCLATURA

Letras Romanas

E	Exergia [kJ]
e	Exergia específica [kJ/kg]
\dot{E}	Fluxo de exergia [kJ/s]
f	Fração de exergia consumida
I	Indicador
M	Massa molecular [$kg/kmol$]
\dot{m}	Fluxo de massa [kg/s]
P	Pressão [kPa]
\bar{R}	Constante universal dos gases ($8,13 \text{ kJ/Kkmol}$)
T	Temperatura [$^{\circ}C, K$]
x	Fração molar

Letras Gregas

γ	Composição
η	Eficiência
ρ	Densidade [kg/l]

Sub-índices

0	Condições de referência
C	Consumido

<i>ch</i>	Química
<i>e</i>	Elétrico
<i>eq</i>	Equivalente
<i>f</i>	Combustível
<i>g</i>	Gases de exaustão
<i>II</i>	Segunda lei da termodinâmica
<i>i, j, k</i>	Item <i>i/j/k</i>
<i>k</i>	Cinética
<i>mis</i>	Mistura
<i>p</i>	Produto
<i>ph</i>	Física
<i>pot</i>	Potencial

Super-índices

<i>ch</i>	Química
-----------	---------

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	2
1.2 OBJETIVOS	4
1.2.1 Objetivo Geral	4
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	5
2.2 BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO	8
2.3 EXERGIA E ANÁLISE EXERGÉTICA	10
2.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	11
3 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E REALIZAÇÃO DO INVENTÁRIO	17
3.1 RECONHECIMENTO DO PROBLEMA	17
3.1.1 Etapa 1.....	18
3.1.1.1 Descrição do transporte do RSU	18
3.1.2 Etapa 2.....	18
3.1.2.1 Descrição do aterro sanitário	18
3.1.3 Etapa 3.....	20
3.1.3.1 Descrição do processo de tratamento do biogás.....	21
3.1.3.2 Descrição do motogerador	22
3.2 DOMÍNIOS DO PROBLEMA	23
3.2.1 Sistema completo	23
3.2.2 Domínio 1	24
3.2.3 Domínio 2	24
3.3 INVENTÁRIO	25
3.3.1 Etapa 1: Transporte	26
3.3.2 Etapa 2: Aterro sanitário.....	26
3.3.3 Etapa 3: Geração de energia	27
4 MODELO DAS ANÁLISES EXERGÉTICA E AMBIENTAL	29
4.1 MODELO DA ANÁLISE EXERGÉTICA	29
4.2 MODELO DA ANÁLISE AMBIENTAL	34
5 RESULTADOS.....	37
5.1 ANÁLISE EXERGÉTICA.....	37
5.1.1 Domínio 1	37
5.1.2 Domínio 2	38
5.1.3 sistema completo.....	39
5.2 ANÁLISE AMBIENTAL	42

5.3 PROPOSTAS ALTERNATIVAS PARA USO RACIONAL DO BIOGÁS.....	48
5.3.1 Cenário 1: <i>Chiller</i> de absorção.....	48
5.2.2 Cenário 2: Caldeira a biogás.....	50
6 CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS	55
APÊNDICE A – Exergia química específica do biogás	59
APÊNDICE B – Composição e exergia dos gases de exaustão....	61
APÊNDICE C – Memorial de cálculos: Análise exergética	63
APÊNDICE D – Memorial de cálculos: Análise ambiental.....	67

1 INTRODUÇÃO

A maioria expressiva das plantas termelétricas no mundo opera usando combustíveis fósseis como o carvão e o gás natural e emitem grandes quantidades de gases de efeito estufa (GEE). Apesar do uso predominante dos combustíveis fósseis na matriz energética global, há um considerável aumento no uso das fontes de energia alternativas (IEA, 2012).

O aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) aparece como uma interessante fonte de energia para geração de potência, reduzindo o impacto. As emissões de GEE provenientes dos RSU tem-se convertido numa grande preocupação. Segundo o Banco Mundial (2012) estas emissões correspondem a 5% (1.460 milhões de toneladas de CO₂-eq por ano), das emissões totais de GEE no mundo.

O RSU representa os resíduos sólidos e semisólidos gerados em núcleos urbanos de origem industrial, usos domésticos e limpeza geral (ABNT 10004, 2004). O biogás é o gás gerado na decomposição anaeróbica da matéria orgânica presente no RSU. Esse biogás é composto principalmente de metano e dióxido de carbono, que são os gases que representam o maior impacto no efeito estufa. O biogás liberado à atmosfera pode ser capturado e queimado para diminuir o impacto ambiental ou então utilizado em motores para gerar energia simultaneamente.

A tendência ao aumento da população e das concentrações urbanas traz como consequência o aumento dos RSU e, portanto o aumento de emissões de GEE. Atualmente 3.000 milhões de residentes urbanos no mundo geram 1.300 milhões de toneladas de RSU por ano. Para o ano 2025 a população urbana será de 4.300 milhões e o RSU gerado será de 2.200 milhões de toneladas (WORLD BANK, 2012). São necessárias pesquisas para decidir a melhor forma de gerenciar o resíduo que promovam a redução do impacto ambiental. Uma interessante alternativa se concentra no aproveitamento do seu potencial energético. Diferentes tecnologias têm sido desenvolvidas e aperfeiçoadas, envolvendo a incineração direta dos resíduos e queima do biogás gerado nos aterros sanitários. Nesse cenário o biogás ocupa um espaço importante na geração de eletricidade. Os gases gerados na decomposição dos RSU podem ser capturados e levados a grupos geradores, com a perspectiva inclusive de atender as demandas elétricas e térmicas.

Embora o cenário esteja melhorando no Brasil, a maioria dos municípios simplesmente despejam o RSU a céu aberto. Em geral, não há nenhum controle dos gases gerados no Brasil (ABRELPE, 2010). A quantidade de biogás gerado na decomposição depende principalmente da fração mássica de matéria orgânica na composição dos resíduos, que no Brasil é de aproximadamente 51%.

É consenso de que futuros sistemas de conversão de energia deverão minimizar o consumo de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, reduzir o impacto ambiental. Como consequência disso, grande número de artigos são publicados apontando para a redução das emissões e também para a necessidade de buscar alternativas menos poluentes.

Embora existam estudos relacionados com a geração de energia a partir do biogás de aterro sanitário, há poucas pesquisas focadas na associação da análise exergética com análise ambiental. Neste trabalho foram realizadas as análises exergética e ambiental da geração de energia com o biogás gerado no aterro sanitário de Canhanduba. No caso em estudo, a análise ambiental foi implementada seguindo a metodologia de análise de ciclo de vida (ACV), que é suportada pelas normas européias ISO 14040 (2006) e 14044 (2006) que são amplamente aceitas para processos industriais. A ACV é considerada uma ferramenta para quantificar o correspondente impacto ambiental. Existem diferentes categorias de impacto ambiental que podem ser avaliadas como acidificação, ecotoxicidade, uso do solo, radiação, etc. Neste trabalho foi selecionada a mudança climática como categoria de impacto.

O estudo foi realizado dentro do projeto intitulado “BIOGÁS: Desenvolvimento de soluções tecnológicas a partir do biogás produzido em sistema de tratamento de esgotos e aterros sanitários para geração de energia elétrica” que é fomentado através da Financiadora de estudos e projetos (FINEP). O projeto junta algumas universidades federais do Brasil e na UFSC está dirigido pelo departamento de Engenharia sanitária e ambiental e conta também com a participação do departamento de Engenharia mecânica. A coleta de dados relacionada ao tratamento do biogás e a unidade geradora foi realizada com a colaboração da empresa Itajaí Biogás e Energia S.A., e a coleta de dados relacionada aos processos do aterro sanitário foi realizada com a colaboração da empresa Ambiental Saneamento e Concessões Ltda.

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O aterro sanitário estudado localiza-se no município de Itajaí, no estado de Santa Catarina, Brasil. O RSU é coletado em Itajaí e Balneário Camboriú e liberado no aterro sanitário. O aterro sanitário iniciou operações no ano 2006 e tem uma vida útil estimada de 23 anos. A primeira fase está fechada e tem 650.000 toneladas de RSU que foram acumuladas até o ano 2012. Agora, a segunda fase está recebendo os RSU numa nova área do aterro sanitário desde o fechamento da primeira fase.

Na análise foram consideradas três etapas. A Etapa 1 corresponde ao transporte dos RSU desde os centros urbanos até o aterro sanitário. A Etapa 2 corresponde aos processos que ocorrem no aterro sanitário. A etapa 3 corresponde à geração de eletricidade utilizando o biogás que é capturado no aterro sanitário. Esta terceira etapa inclui o processo de tratamento do biogás e a unidade geradora de potência e está localizado nas instalações no aterro sanitário. Na Fig. 1.a é mostrada a fronteira estendida do sistema.

O sistema foi dividido em dois domínios com o propósito de entender o biogás como combustível. O Domínio 1 compreende a Etapa 1 e a Etapa 2. O Domínio 2 compreende a Etapa 3. Os domínios considerados são mostrados na Fig. 1.b.

Foram selecionados dois domínios devido a que a fonte de exergia considerada para a análise é o biogás gerado no aterro sanitário e não o RSU. O biogás sai do Domínio 1 e entra no Domínio 2, sendo assim a fonte de exergia considerada no Domínio 2. A análise exergetica foca-se no Domínio 2 onde são conhecidos os fluxos de exergia que entram e saem. A análise ambiental inclui o Domínio 1 e o Domínio 2 obtendo assim o impacto ambiental nos processos referentes às etapas 1, 2 e 3.

Os caminhões empregam o diesel como combustível para transportar o RSU desde os municípios até o aterro sanitário. No aterro sanitário, uma caldeira queima gás liquefeito de petróleo (GLP) para o tratamento do resíduo sólido de serviços de saúde.

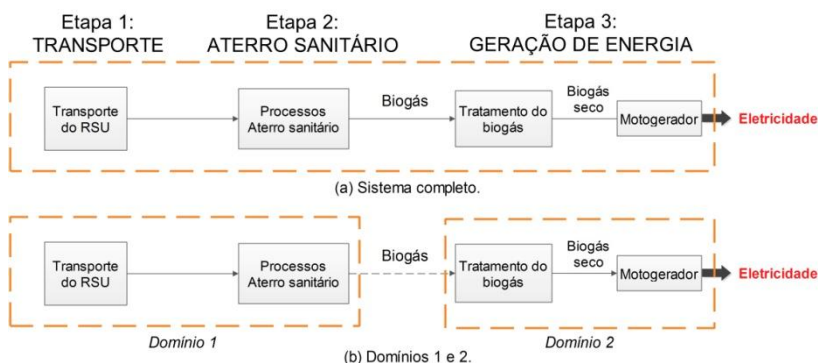


Figura 1 - Identificação das fronteiras.

No aterro sanitário, o RSU é liberado de forma estruturada em camadas isoladas para proteção do solo e permitir a decomposição do RSU. A decomposição do RSU ocorre num processo anaeróbico, onde o biogás é capturado para posteriormente ser transportado ao processo de tratamento na Etapa 3 que está localizado dentro das instalações do aterro sanitário. Na Etapa 2 é utilizada a energia elétrica para os subprocessos do aterro sanitário. Dependendo da configuração do aterro sanitário, a literatura propõe uma eficiência na coleta do biogás entre 50 e 100% (BARLAZ; CHANTON; GREEN, 2009).

O biogás é aspirado para ser levado ao processo de tratamento onde é esfriado e desumidificado. Aqui a instalação precisa de energia elétrica para operar. Subsequentemente o gás é queimado num motogerador, onde é produzida energia elétrica. Atualmente a capacidade de potência instalada no aterro sanitário é de 1.060 kW e fornecida por uma unidade geradora. O projeto de produção de energia inclui a instalação de uma unidade geradora adicional no ano 2015 e uma terceira no ano 2020, com as quais a instalação alcançaria

uma capacidade total de 3.180 kWe. A energia gerada é conectada com a rede elétrica da região.

O presente trabalho é desenvolvido com o intuito de analisar o processo de geração de energia a partir do biogás de aterro, visando dois aspectos: um relacionado ao desempenho termodinâmico e outro ao impacto ambiental na categoria de impacto de mudança climática. O estudo também foi motivado pela possibilidade de realizar as análises a partir de um caso real no aterro sanitário de Canhanduba e fazendo parte de um projeto.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é estabelecer modelos de análises exergética e ambiental do processo de geração de eletricidade a partir do biogás obtido nos aterros sanitários, considerando uma fronteira estendida que compreende os processos de transporte do RSU, decomposição do RSU, tratamento do biogás e geração de energia.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Definir os modelos exergético e ambiental, identificando os indicadores considerados importantes para caracterizar o processo de geração de energia. Os modelos definidos servem como base para a realização das análises;
- b) Realizar uma análise exergética e ambiental do aterro sanitário de Canhanduba existente no município de Itajaí - Santa Catarina.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Nos últimos anos, a quantidade de RSU gerado no mundo tem crescido mais rápido do que a população, implicando em impactos ambientais, como também em importante fonte de exergia. Segundo o Banco Mundial, o gerenciamento dos resíduos sólidos é o serviço mais importante proporcionado por uma cidade. Na América Latina e no Caribe, a quantidade total de RSU gerado por ano é 160 milhões de toneladas que corresponde a 12% de geração mundial, com uma média de geração per capita de 1,1 kg/dia (WORLD BANK, 2012).

Os resíduos podem ser classificados de diferentes formas. É apresentada a classificação proposta pela ABNT. Os RSU são classificados em dois grupos: perigosos e não perigosos (ABNT 10004, 2004). O segundo grupo é subdividido em inertes e não inertes. A classificação dos resíduos é representada e realizada seguindo o fluxograma da Fig. 2. A classificação é realizada de acordo com as características do resíduo que, de acordo com a norma, estão divididos em códigos desde a até g, assim:

- a) Resíduos perigosos de fontes não específicas;
- b) Resíduos perigosos de fontes específicas;
- c) Substâncias que conferem periculosidade aos resíduos;
- d) Substâncias agudamente tóxicas; e
- e) Substâncias tóxicas.

De acordo com a ABRELPE (2012), do ano 2011 para 2012 a geração de resíduos sólidos cresceu 1,3%, atingindo 63 milhões de toneladas por ano. No entanto a geração de resíduos sólidos per capita cresceu 0,4%, chegando a 383 kg/ano. No mesmo período a coleta total de resíduos aumentou 1,9%. Na região sul do Brasil, de 20.800 t/dia geradas, são coletadas 19.200 t/dia de RSU. A geração corresponde a 0,91 e a coleta a 0,84 kg/hab./dia, sendo a região com os menores valores de geração e coleta per capita no país. De acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, apresentado pelo ministério do meio ambiental, a estimativa da composição gravimétrica de RSU coletados no Brasil em 2008 é mostrada na Tab. 1 (2011). A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) contempla diversos tipos de resíduos gerados, alternativas de gestão e gerenciamento passíveis de implementação, bem

como metas para diferentes cenários, programas, projetos e ações correspondentes.

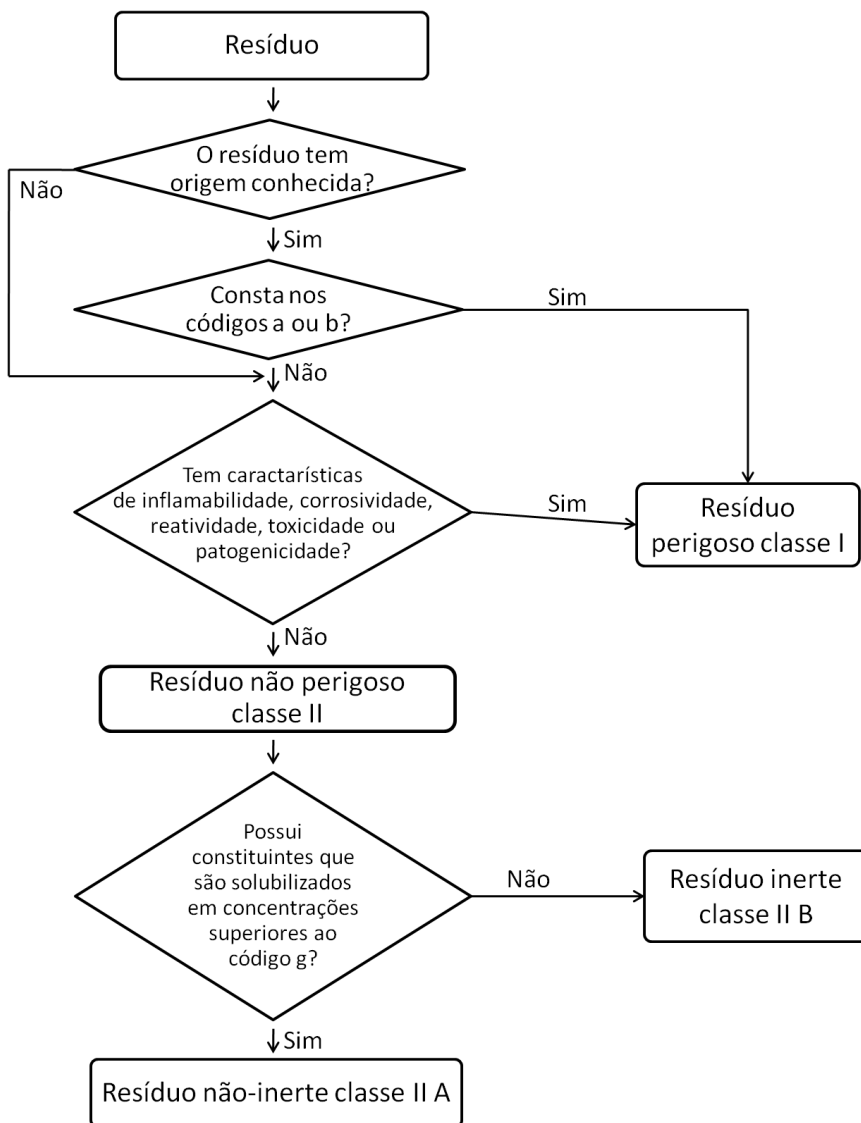


Figura 2 - Fluxograma de caracterização e classificação dos resíduos sólidos urbanos (ABNT 10004, 2004).

No ano 2012, 58% do RSU foi disposto de forma ambientalmente adequada em aterros sanitários, e o restante foi disposto de forma inadequada, sendo 24% liberado em aterros controlados e 17% em lixões. A destinação inadequada se faz presente em todas as regiões e estados brasileiros. No estado de Santa Catarina o RSU destinado adequadamente é 72% e corresponde a 4.600 t/dia.

Tabela 1 – Estimativa de composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008 (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2011).

Material	Participação (%)	Quantidade (t/ano)
Metais	2,9	1.640.294
Papel, Papelão e Tetrapak	13,1	7.409.603
Plástico	13,5	7.635.851
Vidro	2,4	1.357.484
Matéria Orgânica	51,4	29.072.794
Outros	16,7	9.445.830
TOTAL	100,0	56.561.856

Embora existam iniciativas de coleta seletiva na maioria dos municípios no Brasil, em grande parte o RSU coletado não conta com nenhum tipo de coleta seletiva e é liberado nos aterros sanitários como uma mistura de materiais.

O gerenciamento integrado dos resíduos sólidos reflete a necessidade de abordá-los de uma forma cuidadosa e responsável, fazendo uso da tecnologia apropriada, condições de trabalho e estabelecimento de uma ligação social entre as comunidades e as autoridades gerenciadores do resíduo sólido (WORLD BANK, 2012).

O setor de gerenciamento da disposição dos RSU segue uma hierarquia geralmente aceita, que é mostrada na Fig. 3. A hierarquia incentiva a redução de emissões de GEE e responde a considerações financeiras, ambientais e sociais.

A redução dos resíduos inclui prevenção, minimização e reuso, reduzindo a quantidade de resíduos gerados. A reciclagem e recuperação de materiais reduzem também a quantidade de RSU disposto e retorna parte daqueles à economia. No processo de compostagem é evitada a formação de metano associada às condições anaeróbias, enquanto no processo de digestão anaeróbia é gerado metano que pode ser queimado

ou usado para gerar eletricidade. Quando o resíduo sólido é incinerado, a quantidade de material que é disposto diminui, dependendo da composição gravimétrica do mesmo. Os aterros sanitários são preparados e desenhados para proteger o meio ambiente e a saúde pública. O gás produzido nos aterros sanitários também pode ser capturado e queimado ou usado para gerar eletricidade.



Figura 3 - Hierarquia dos resíduos sólidos (WORLD BANK, 2012).

Alguns trabalhos realizados focam-se no estudo de planos de gerenciamento dos resíduos sólidos nos municípios. Rodrigues (2009) realizou um estudo que tem como objetivo desenvolver um plano de gerenciamento de RSU no município de Imbituba - SC, Brasil. Foi realizada uma caracterização do município através de um levantamento de dados e informações e foi analisada a viabilidade da implantação da coleta seletiva. No estudo, são levados em conta aspectos como condições de saúde, qualidade de vida e meio ambiente. Foi identificado o potencial de reciclagem dos resíduos gerados no município, surgindo assim algumas propostas de melhoramento do sistema.

2.2 BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO

O biogás de aterro sanitário é resultado de processos físicos, químicos e microbianos. Esses processos dependem do meio onde

ocorrem, das condições naturais e das atividades humanas (WORLD BANK - ESMAP, 2004).

Quando é modelado e avaliado o potencial de uso de biogás de aterro como combustível, há dois aspectos principais que devem ser levados em conta. O primeiro deles é a estimativa da quantidade de biogás que está sendo produzida no aterro sanitário, e o segundo é a proporção dos gases que podem ser coletados até o final do projeto.

A composição do biogás de aterro sanitário depende do sistema microbiano, dos resíduos sólidos e das variáveis do aterro como o acesso do oxigênio e o teor de umidade. Os principais componentes do biogás são o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2) que são os gases que mais contribuem com o efeito estufa. Destaca-se o alto potencial calorífico do metano. Outros componentes do biogás de aterro são o nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2), monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H_2) e ácido sulfídrico (H_2S). A composição do biogás pode conter até 350 constituintes, com traços que chegam representar até 1% do conjunto. A maioria desses constituintes é formada por compostos orgânicos, porém também pode conter compostos inorgânicos (ENVIRONMENTAL AGENCY, 1999). Na Tab. 2 é mostrada a composição típica do biogás de aterro com algumas propriedades dos seus componentes (GANDOLLA; ACAIA; FISCHER, 1997).

Tabela 2 - Composição típica do biogás de aterro e propriedades dos componentes (GANDOLLA; ACAIA; FISCHER, 1997).

Gás	Concentração Típica	Densidade (kg/Nm³)	Potencial calorífico (kJ/Nm³)	Propriedades gerais
CH_4	45-60%	0,717	35.600	inodoro, incolor, não tóxico, asfixiante e inflamável
CO_2	35-50%	1,977	-	inodoro, incolor e asfixiante
N_2	0-10%	1,25	-	inodoro e incolor
O_2	0-4%	1,429	-	inodoro e incolor
CO	<0,1%	1,25	12.640	inodoro, incolor, tóxico e inflamável
H_2	<0,1%	0,09	10.760	inodoro, incolor, não tóxico e inflamável
H_2S	0-70 ppm	1,539	-	inolor e muito tóxico

Alguns dos constituintes do biogás de aterro são os siloxanos, compostos de carbono, hidrogênio, oxigênio e silício. Apesar de serem inertes, estes compostos podem se converter em sólidos inorgânicos de silício quando depositados nas câmaras de combustão dos motores, reduzindo assim a sua vida útil (CONESTOGA-ROVERS, 2010). Os siloxanos podem ser removidos antes de entrar no motor ou então, opcionalmente, pode ser incrementada a manutenção do mesmo. Estes compostos, mostrados na Tab. 3, podem ser divididos em cíclicos (denotados com a letra D) e lineares (denotados com a letra L). O biogás de aterro pode conter quantidades significantes de D3, D6, L2 e L5.

Tabela 3 - Siloxanos lineares e cíclicos (WHELESS; PIERCE, 2004).

Nome	Fórmula	Abreviatura
Hexamethylcyclotrisiloxane	$C_{12}H_{18}O_3Si_3$	D3
Octamethylcyclotetrasiloxane	$C_8H_{24}O_4Si_4$	D4
Decamethylcyclopentasiloxane	$C_{10}H_{30}O_5Si_5$	D5
Dodecamethylcyclohexasiloxane	$C_{12}H_{36}O_6Si_6$	D6
Hexamethyldisiloxane	$C_6H_{18}Si_2O$	L2
Octamethyltrisiloxane	$C_8H_{24}Si_3O_2$	L3
Decamethyltetrasiloxane	$C_{10}H_{30}Si_4O_3$	L4
Dodecamethylpentasiloxane	$C_{12}H_{36}Si_5O_4$	L5

2.3 EXERGIA E ANÁLISE EXERGÉTICA

Segundo a definição de exergia apresentada por Çengel e Boles (2010, p. 423) “a exergia é o máximo trabalho útil que pode ser obtido de um sistema em um determinado estado e em um ambiente especificado”.

A qualidade de diferentes formas de energias desordenadas depende da forma destas energias, dos parâmetros do portador de energia e do ambiente.

Excluindo efeitos nucleares, magnéticos, elétricos e interfaciais, a exergia E de uma substância pode ser dividida em quatro componentes: exergia cinética E_k , exergia potencial E_{pot} , exergia física E_{ph} e exergia

química E_{ch} , sendo a exergia total a soma dos quatro componentes (SZARGUT; MORRIS; STEWARD, 1988):

$$E = E_k + E_{pot} + E_{ph} + E_{ch} \quad (1)$$

Engenheiros e cientistas têm usado o balanço de entalpia por mais de um século para quantificar as perdas de eficiência em um processo devido às perdas de energia. A avaliação exergética permite quantificar a perda de eficiência em um processo devido à perda de qualidade da energia. Esta análise indica onde pode ser melhorado o processo. O principal objetivo da análise exergética é detectar e avaliar quantitativamente as causas da imperfeição termodinâmica de processos térmicos.

Neste trabalho é considerada a definição de eficiência exergética dada por Bejan, Tsatsaronis e Moran (1996). Para definir a eficiência exergética é necessário identificar o produto e o combustível do sistema termodinâmico que está sendo analisado. O produto representa o resultado que é desejado para ser produzido pelo sistema e tem que estar de acordo com o objetivo de uso do sistema termodinâmico. O combustível representa os recursos utilizados para gerar o produto. Tanto o produto quanto o combustível devem ser expressos em termos de exergia. A eficiência exergética é a razão entre as taxas de exergia.

$$\eta_{II} = \frac{\dot{E}_p}{\dot{E}_f} \quad (2)$$

2.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Todos os processos precisam de recursos materiais ou energéticos para atingir o objetivo. O uso desses recursos implica em um impacto ambiental que pode ser classificado, dependendo do dano que possa causar dito impacto. Com o objetivo de quantificar esse impacto e a crescente conscientização quanto à importância da proteção ambiental, têm sido propostas algumas metodologias de avaliação do desempenho ambiental de sistemas de produção. Uma destas metodologias é a avaliação do ciclo de vida (ACV) que no Brasil segue as normas ABNT NBR ISO 14040 (2009) e 14044 (2009). Segundo a ABNT NBR ISO 14040, a avaliação do ciclo de vida enfoca os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais ao longo de todo o ciclo de vida de um

produto, que implica na aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem e a disposição final.

Na avaliação do ciclo de vida é considerado e quantificado o impacto ambiental devido a todos os processos e subprocessos que acompanham um produto, desde a extração e aquisição de matérias-primas para sua obtenção durante sua vida útil, até a disposição final. O método da avaliação do ciclo de vida proposto na norma ABNT NBR ISO 14040 segue uma estrutura, mostrada na Fig. 4, com o objetivo de obter o impacto ambiental associado a um produto ou serviço. As quatro fases da ACV são os seguintes:

- 1) Definição do objetivo e escopo;
- 2) Análise do inventário de ciclo de vida (ICV);
- 3) Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV); e
- 4) Interpretação.

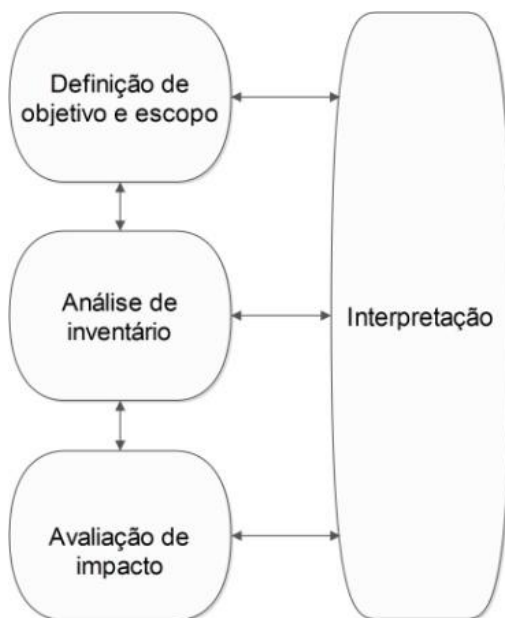


Figura 4 - Fases da avaliação de ciclo de vida.

A definição do objetivo e escopo são as duas partes consideradas na primeira fase. O objetivo corresponde à característica do processo e à razão do estudo. A definição do escopo define o sistema que vai ser analisado. Neste passo são definidas a categoria de impacto a ser avaliada e a unidade funcional para descrever o produto da análise.

Na segunda fase é realizado o inventário de ciclo de vida, levando em conta os fluxos de energia, massa e emissões considerados relevantes para a análise e relacionados à unidade funcional.

Na terceira fase é avaliado o impacto do ciclo de vida. Aqui é definido um método e as categorias de impacto a ser avaliadas utilizando a informação do inventário como dados de entrada. Finalmente, na quarta fase, é realizado o cálculo dos indicadores da categoria, convertendo os resultados da avaliação do impacto de ciclo de vida em base às unidades da categoria de impacto.

Alguns trabalhos que utilizaram o método ACV para avaliar sistemas de energia podem ser citados. Tonini e Astrup (2012) avaliam o impacto ambiental aplicando o método ACV de potenciais sistemas de energia futuros com alta participação do vento e biomassa como fontes de energia na Dinamarca. Foram considerados dois tipos de combustíveis utilizados no transporte: fóssil e biodiesel. Os resultados mostraram que para o ano 2050 as emissões de GEE por unidade de energia fornecida pode ser significativamente reduzida, incrementando o uso do vento e biomassa residual como fontes de energia e também eletrificando o transporte. Os cultivos energéticos para produção de biodiesel e o uso de biocombustíveis para transporte terrestre pesado foram responsáveis pelo maior impacto.

Valente, Spinelli e Hillring (2011) estudaram um sistema de exploração madeireira com coleta de resíduos a partir de uma ACV. Os autores avaliam o impacto, na categoria de impacto mudança climática, da cadeia logística do uso madeira como biomassa utilizada em plantas de aquecimento no norte da Itália. Os resultados mostram que o impacto devido à obtenção da madeira corresponde a $13 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}/\text{m}^3$, onde o corte da madeira contribui com o maior impacto. Foi concluído que o impacto ambiental é reduzido quando o óleo ou o gás natural, utilizados na planta de aquecimento residencial, são substituídos por bioenergia obtida a partir da madeira.

Os sistemas de conversão de energia têm sido estudados considerando alguns aspectos como os técnicos, ambientais, econômicos e sociais. Alguns trabalhos consistem no estudo de alguns destes aspectos e em alguns casos são associados em estudos, por exemplo, exergoambientais, tecno-econômicos, etc. Também são propostas

diferentes metodologias de avaliação de sistemas de conversão por alguns autores.

Frangopoulos e Caralis (1997) propuseram uma metodologia para levar em consideração o impacto ambiental na análise econômica de sistemas de energia, envolvendo no custo total, o custo ambiental e social. A proposta foi construída a partir de duas questões: como calcular o custo externo da produção de eletricidade e como conseguir abordar metodologicamente o problema para que os custos fiquem imersos na avaliação dos sistemas térmicos.

Lombardi (2001) realizou uma avaliação exergética do ciclo de vida e uma avaliação do ciclo de vida para três ciclos de potência de baixa emissão de dióxido de carbono. A ACV é principalmente focada na produção de CO₂ durante a construção, operação e desmontagem das plantas. Além da ACV, foi implementada a avaliação exergética do ciclo de vida com o propósito de avaliar os investimentos exergéticos do ciclo de vida das plantas. Os resultados mostraram que a avaliação do ciclo de vida foi selecionada como sendo o critério de comparação mais apropriado.

Hamelinck, Suurs, e Faaij (2005) calculam o custo, o uso de energia dos componentes (armazenamento, processamento e transporte) e as emissões de CO₂ considerando diferentes sistemas de adensamento, meios de transporte e armazenamento para importação de biomassa no leste da Europa. Os autores levaram em conta os custos extras, consumos de energia, material perdido e logística. A utilização de peletização como sistema de adensamento e o transporte por barco mostraram resultados com menores emissões de CO₂. Concluíram que o adensamento reduz fortemente o número de movimentos no transporte, embora num ponto a massa se torne restritiva em vez do volume e, portanto a densificação fica redundante.

Restrepo (2012), em um trabalho desenvolvido na UFSC, apresentou uma proposta metodológica de análise e avaliação exergoambiental de plantas termoeletricas operando em combustão combinada carvão-biomassa, considerando uma fronteira estendida que compreende a usina e a rota tecnológica para a obtenção e manuseio do combustível. A análise ambiental é realizada utilizando o método de ACV para obter o impacto ambiental. No estudo é realizada uma análise geral e uma análise local. A análise geral considera as etapas de obtenção, transporte, processamento dos combustíveis e o ciclo térmico. A análise local considera unicamente a usina, avaliando o desempenho exergoambiental dos componentes. Os resultados da ACV mostraram que no caso de operação com 90% de carvão e 10% de biomassa, o ciclo

térmico responde por 90,9% do total de impacto gerado associado à categoria de impacto mudança climática.

Pertl, Mostbauer e Obersteiner (2010) realizaram uma abordagem do ciclo de vida avaliando o impacto da produção de energia a partir de fontes renováveis, onde o cenário de referência selecionado foi a produção de energia a partir de gás natural. Os autores consideraram dois substratos: (1) fontes agrícolas e (2) RSU no processo de digestão anaeróbia. Os resultados mostraram que a redução de emissões de GEE pode estar limitada pelo contexto agrícola onde o impacto é só 10% menor quando comparado com o cenário de referência.

Algumas pesquisas têm sido realizadas com relação à viabilidade da produção de energia a partir do biogás de aterro sanitário. Viana (2009) faz um estudo de caso analisando a viabilidade técnica e econômica da geração de energia a partir do biogás de aterro, comparando diferentes tecnologias. Ele conclui que a melhor alternativa é o uso do biogás em motores de combustão interna.

Em outro estudo reportado por Xydis et al. (2013) é avaliada a produção do biogás num aterro sanitário em Vólos - Grécia, a partir de uma análise exergética, levando em conta o processo de biodigestão, o transporte do biogás, a desumidificação do biogás e a unidade geradora de potência. Os autores concluíram que a produção do biogás é apropriada para uso na geração de eletricidade, representando uma alternativa viável para substituir algumas fontes de energia convencionais. Os resultados mostraram que uma operação rentável, pode ser sustentada por 20 anos e a eficiência exergética do sistema foi de 33%.

Para avaliar o processo de geração termelétrica são aplicadas as análises exergética e ambiental, permitindo identificar as etapas consideradas relevantes no processo de geração de energia do ponto de vista exergético e ambiental. A metodologia foi proposta por Restrepo (2012) para realizar as análises exergética e ambiental da geração de eletricidade em plantas termelétricas operando em combustão combinada carvão-biomassa. Esta estrutura consiste em cinco passos, dos quais dois correspondem à análise local da usina. Para o estudo apresentado, a metodologia foi simplificada e adaptada, considerando os passos referentes ao reconhecimento do problema e a análise geral. A estrutura metodológica que é trabalhada neste estudo consiste em três passos como é mostrado na Fig. 5. O Passo 1 se refere ao reconhecimento do problema, o Passo 2 inclui as análises exergética e ambiental e o último, o Passo 3, consiste numa análise dos resultados.

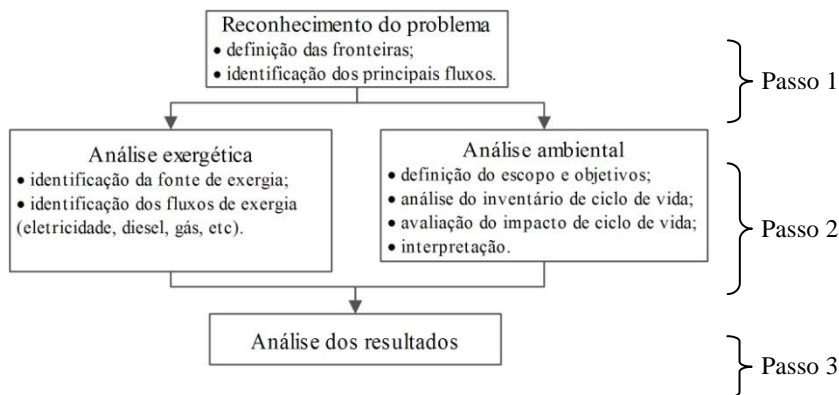


Figura 5 - Estrutura metodológica para a análise exergética e ambiental.

Este trabalho segue a estrutura da proposta metodológica de Restrepo (2012), por se tratar de uma metodologia desenvolvida no laboratório Labcet do programa de Engenharia mecânica da UFSC, para análise de sistemas de conversão de energia.

3 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E REALIZAÇÃO DO INVENTÁRIO

Inicialmente é feito uma análise visual dos processos envolvidos, para definir as fronteiras, fluxos e critérios de corte. Depois de definir a fronteira são identificados os processos considerados relevantes (alguns processos podem ser excluídos com base em resultados anteriores). O critério de corte dos fluxos de entrada e saída de massa e energia deve ser feito considerando o impacto associado a cada fluxo. A partir daqui, foi desenvolvido um fluxograma com o objetivo de mostrar as conexões entre os fluxos de massa e energia das etapas identificadas. Usando o fluxograma, é realizada uma descrição do sistema, explicando a inter-relação entre os fluxos e os processos considerados.

Depois de reconhecer o problema, foram identificados os domínios do sistema. Uma vez identificado o problema, foi realizado o inventário dos fluxos de massa e energia dos fluxos que entram e saem desses domínios.

É importante levar em conta que a capacidade total de produção de biogás no aterro sanitário de Canhanduba é três vezes maior que o volume de biogás utilizado em um motogerador, segundo estimativas realizadas pela empresa Itajaí Biogás e Energia S.A. Por isso, do total dos consumos de combustíveis e eletricidade nos processos do transporte e do aterro sanitário, a terça parte é atribuída à produção do biogás que é queimado em um motogerador. Também é considerada que uma terça parte das emissões que ocorrem no transporte e no aterro sanitário é devida ao biogás utilizado atualmente.

3.1 RECONHECIMENTO DO PROBLEMA

Como resultado do reconhecimento visual dos processos, foi sugerida uma fronteira estendida que inclui os processos de conversão de energia no motogerador e os processos à montante da unidade geradora necessários para transportar o RSU e obter o biogás tratado para ser queimado no motogerador. A Fig. 6 mostra as etapas do processo de geração de energia a partir do biogás.



Figura 6 - Etapas do processo de geração de energia a partir do biogás de aterro.

Na continuação são descritos os processos considerados, correspondentes às três etapas identificadas:

3.1.1 Etapa 1

3.1.1.1 Descrição do transporte do RSU

O transporte é realizado utilizando caminhões Mercedes Benz Atego modelo 1718 e 1719. Do total, 53% do RSU que é liberado no aterro é coletado no município de Itajaí e 47% no município de Balneário Camboriú. O consumo médio mensal de combustível é de 34.542 l de diesel do tipo S500 e S10, que corresponde a uma distância percorrida de 68.166 km. O transporte do RSU desde os municípios ao aterro, assim como as operações do aterro, é de responsabilidade da empresa Ambiental Saneamento e Concessões Ltda.

A distância média percorrida pelos caminhões (ida e volta) desde o aterro sanitário de Canhanduba até o ponto de coleta do RSU é de 30 km para o município de Itajaí e 25 km para o município de Balneário Camboriú. No mapa da Fig. 7 são identificados os municípios e o aterro sanitário.

3.1.2 Etapa 2

3.1.2.1 Descrição do aterro sanitário

Como dito anteriormente, o aterro sanitário de Canhanduba está localizado no município de Itajaí - SC. A Fig. 8 mostra uma vista aérea do aterro sanitário.

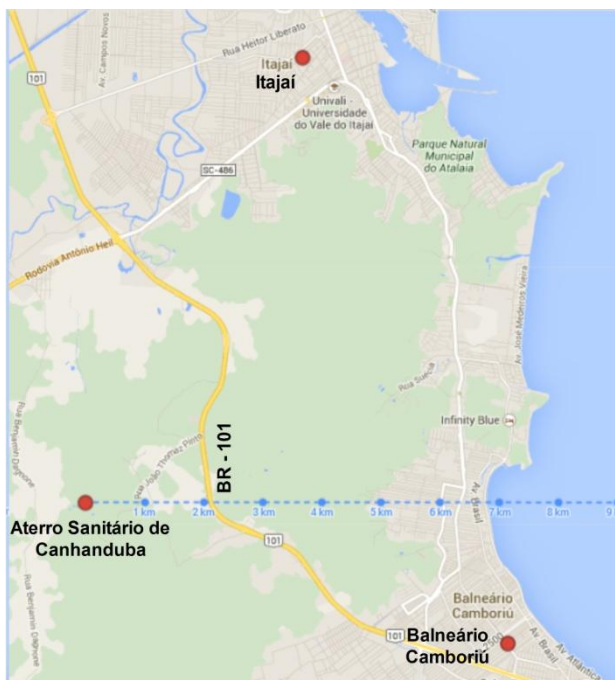


Figura 7 - Mapa da localização do aterro sanitário de Canhanduba e os municípios de Itajaí e Balneário Camboriú. Adaptado de: <https://www.google.es/maps>.



Figura 8 - Foto aérea do aterro sanitário de Canhanduba.

O aterro sanitário está em serviço desde o ano 2006, e foi planejado para 23 anos de vida útil. Ele recebe aproximadamente 10.000 t/mês de RSU provenientes dos municípios de Itajaí e Balneário Camboriú, cuja população é de aproximadamente 300.000 habitantes. A área reservada à disposição do RSU é de 27,52 hectares.

Além do RSU o aterro sanitário recebe aproximadamente 38 t/mês de resíduos sólidos de serviços de saúde depois de ser tratados em autoclave. No tratamento é utilizada uma caldeira que utiliza GLP (gás liquefeito de petróleo) como combustível.

Uma vez que o RSU é descarregado no aterro sanitário, começa o processo de degradação do RSU, que implica a geração do biogás. Neste processo de biodigestão, a fração orgânica dos resíduos é transformada em gases e líquidos.

O lixiviado resultante do processo de decomposição é tratado em lagoas antes de ser liberado em forma de águas residuais e resíduo inerte (efluente e lodo). Aproximadamente são tratados 6.300 m³ de lixiviados por mês.

A coleta do biogás consiste na instalação de tubos de captação quando o resíduo é depositado no aterro. Assim o biogás poderá ser extraído facilmente desde o início da sua produção. Não é possível coletar a totalidade do biogás produzido em um aterro, principalmente em função das características construtivas, impermeabilizações e métodos de disposição dos resíduos. Por isso é considerada uma eficiência da coleta do biogás.

3.1.3 Etapa 3:

O biogás atualmente gerado no aterro sanitário recebe um tratamento com a finalidade principal de remover a umidade e estabelecer condições apropriadas para queima em motogerador, especialmente projetado para a geração de eletricidade. A planta consiste de um sistema de drenagem, dois compressores, um *chiller* mecânico, uma chaminé, dois trocadores de calor e um e o motogerador com capacidade de 1060 kW. Na hipótese de interrupção ou manutenção, todo o biogás é desviado para queima direta numa chaminé (*flare*).

3.1.3.1 Descrição do processo de tratamento do biogás

O biogás produzido no aterro sanitário é coletado úmido e transportado ao ponto onde se encontra a instalação para seu tratamento. A temperatura média do biogás coletado no aterro sanitário é 60°C e a pressão média é de 46 mbar. O tratamento compreende principalmente a desumidificação e o resfriamento do biogás para alcançar as condições de operação do motogerador. O biogás entra no motogerador a uma temperatura e pressão aproximadas de 13°C e 125 mbar. A instalação do processo de tratamento do biogás é mostrada na Fig. 9.



Figura 9 - Instalação do processo de tratamento do biogás.

Na primeira parte do tratamento, parte significativa da umidade é removida por meio de um sistema de drenagem. Posteriormente o biogás é resfriado num trocador de calor onde circula água gelada proveniente de uma máquina de refrigeração mecânica (*chiller*). O biogás é então comprimido pelo compressor onde é aquecido. Após isso, o biogás é resfriado novamente no mesmo sistema de resfriamento e levado ao motogerador. O biogás não utilizado pelo motogerador é desviado para queima direta num *flare*. O funcionamento dos equipamentos requer energia elétrica. Na Fig. 10 é mostrada a planta de tratamento do biogás e

o motogerador e na Fig. 11 são mostrados alguns dos equipamentos que fazem parte da instalação de tratamento.

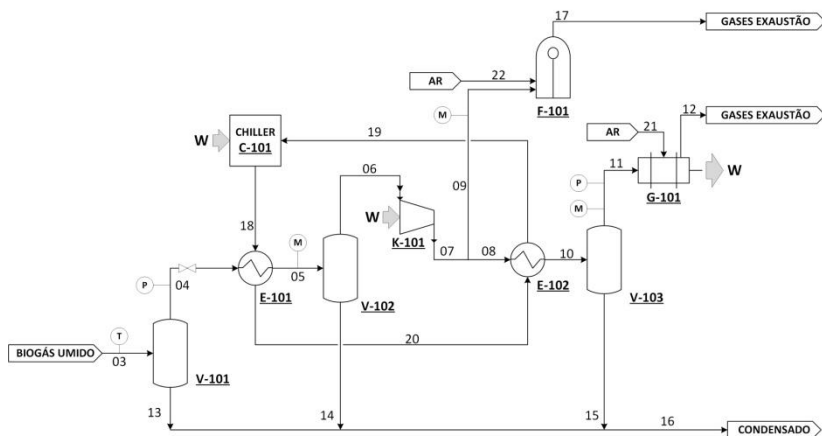


Figura 10 - Esquema da planta de tratamento do biogás e motogerador.

3.1.3.2 Descrição do motogerador

O motogerador considerado para a análise faz parte do aterro sanitário de Canhanduba e é mostrado na Fig. 12. A empresa Itajaí Biogás e Energia S.A. é responsável pelas operações do motogerador, do tratamento e da coleta do biogás

O motogerador instalado no aterro foi projetado pela Dresser-Rand para trabalhar com biogás como combustível. É um motogerador tipo síncrono auto-excitado, ciclo Miller de quatro tempos. A potência máxima nominal do motogerador é de 1.060 kW e a potência nominal de combustível consumido é de 2.786 kW. O fornecimento de biogás deve ser realizado a uma pressão entre 70 e 400 mbar.



Sistema de drenagem



Compressor e trocador de calor 1



Aspiradores



Trocador de calor 2

Figura 11 - Equipamentos do processo de tratamento do biogás.



Figura 11 - Motogerador Dresser-Rand, modelo SFGM560/55, potência de 1.060 kW, instalado no aterro sanitário de Canhanduba.

3.2 DOMÍNIOS DO PROBLEMA

3.2.1 Sistema completo

Na Fig. 13 é apresentado em detalhe o fluxograma correspondente ao sistema completo do problema com os respectivos fluxos de massa, energia e emissões de cada etapa.



Figura 12 - Sistema completo, mostrando as etapas relativas ao transporte de RSU, produção de biogás e geração de eletricidade.

Com o fim de realizar as análises exergética e ambiental, dois domínios foram considerados: Domínio 1 e Domínio 2, conforme já apresentado na Fig. 1.

3.2.2 Domínio 1:

O Domínio 1, conforme mostrado na Fig. 14 inclui os processos a montante do transporte do biogás coletado desde o aterro sanitário até o tratamento do biogás. São consideradas as etapas 1 e 2 que correspondem aos processos de transporte do RSU e produção do biogás no aterro sanitário.

3.2.3 Domínio 2:

O Domínio 2, conforme mostrado na Fig. 15 inclui os processos do tratamento do biogás e o motogerador, aqui também definido como Etapa 3.

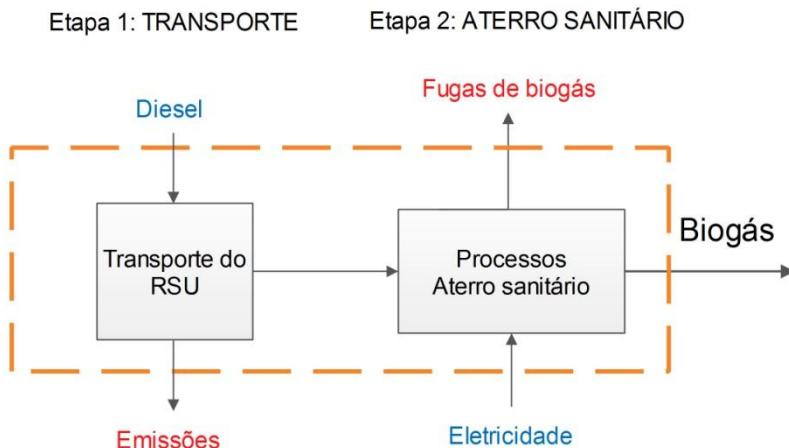


Figura 134 – Esquema representativo do Domínio 1, contemplando o transporte do RSU e o processos de formação do biogás.

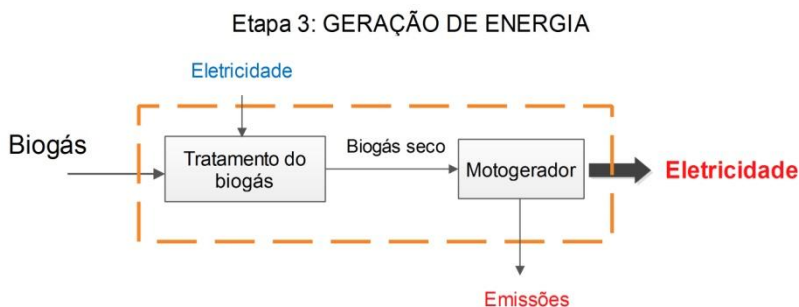


Figura 145 – Esquema representativo do Domínio 2, contemplando o tratamento do biogás e o uso do biogás no motogerador.

3.3 INVENTÁRIO

Nesta seção são organizados os dados já mencionados na descrição do sistema, juntamente com os dados levantados em campo e informações requeridas para realização das análises exergética e ambiental. Informações contidas neste inventário foram também em parte fornecidas pelas empresas. Este inventário não deve ser confundido com o inventário da análise do ciclo de vida da fase 3

(ACV), devido a que o inventário da ACV é realizado em base a uma unidade funcional. O inventário é realizado para cada etapa do processo como segue:

3.3.1 Etapa 1: Transporte

As informações com respeito ao transporte do RSU foram fornecidas pela empresa Ambiental, responsável pela coleta e transporte do RSU gerado nos municípios de Itajaí e Balneário Camboriú. Na Tab. 4 são mostradas as quantidades associadas à Etapa 1.

As quantidades de RSU consideradas neste trabalho para o município de Itajaí correspondem às médias no período de um ano. As informações do RSU transportado, distância percorrida e diesel consumido foram fornecidas só para o município de Itajaí. Para estimar os valores correspondentes ao município de Balneário Camboriú, sabendo que nos dois municípios são usados caminhões com os mesmos modelos, foi considerada a relação entre as distâncias médias percorridas para coletar o RSU em cada município. Também foi considerada a relação das porcentagens do RSU coletado em cada município, informação que foi fornecida pela empresa responsável das operações do aterro sanitário.

Tabela 4 - Inventário da Etapa 1: Transporte.

Parâmetro	Itajaí	Balneário Camboriú	Total	Unidade
RSU transportado	5.350	4.495	9.845	t/mês
Distância percorrida por viagem (ida e volta)	30	25		km
Distância percorrida	39.125	29.041	68.166	km/mês
Diesel consumido	19.826	14.716	34.542	l/mês

3.3.2 Etapa 2: Aterro sanitário

As informações relativas ao funcionamento e processos do aterro sanitário foram fornecidas pela empresa Ambiental. As variáveis consideradas para análise foram eletricidade, fugas de biogás e consumo

de GLP utilizado no tratamento dos resíduos sólidos de serviços de saúde. As fugas de biogás são consideradas unicamente na ACV; por isso nesta seção é levado em conta unicamente a eletricidade necessária para o funcionamento do aterro. O consumo de eletricidade médio no aterro sanitário, segundo o cálculo da empresa de energia, é de 45.154 kWh/mês. O consumo de GLP corresponde a 1.148 kg/mês.

3.3.3 Etapa 3: Geração de energia

Como foi dito anteriormente, a terceira etapa consiste no tratamento do biogás e operação do motogerador. No tratamento tem-se o biogás e eletricidade como variáveis de entrada e no motogerador tem-se saídas de emissões e eletricidade. Na Tab. 5 são mostradas as principais informações fornecidas pela empresa Biogás e Energia, relacionadas às operações da etapa 3.

Tabela 5 - Inventário da Etapa 3: Geração de energia.

Parâmetro	Quantidade	Unidade
Vazão do biogás coletado	435	Nm ³ /h
Eletricidade fornecida pelo motogerador	802	kWe
Eletricidade utilizada tratamento do biogás	45	kWe
Fração molar de metano no biogás coletado	52	%

O biogás coletado corresponde a 435 Nm³/h, é aqui considerado como se fosse utilizado integralmente no motogerador, ou seja, nenhuma porção do biogás é desviada para queimada direta na chaminé (*flare*). Da parcela utilizada para tratamento do biogás, na ordem de 45 kWe, 27 kWe correspondem ao resfriador e 9 kWe ao compressor. A diferença correspondente aos 9 kWe é utilizada no tratamento do biogás e equipamentos auxiliares na operação da planta.

4 MODELO DAS ANÁLISES EXERGÉTICA E AMBIENTAL

O objetivo da análise exergética é identificar irreversibilidades relevantes do processo e oportunidades de otimização nas diversas etapas relativas ao processo de transporte, produção do biogás, tratamento e operação do motogerador. O objetivo da análise ambiental é quantificar o impacto associado a cada processo do sistema. Aqui são explicados os modelos utilizados para cada uma das análises, definindo os domínios e detalhando os fluxos de entradas e saídas de acordo com a abordagem realizada na avaliação exergética e ambiental. A partir desta análise geral, são definidos os fluxos de exergia e impactos ambientais associados a cada etapa.

4.1 MODELO DA ANÁLISE EXERGÉTICA:

A exergia associada aos fluxos de massa, bem como, a exergia destruída correspondente são calculadas a partir do inventário realizado no Capítulo 3 e seguindo as seguintes pautas, considerando como estado de referência $T_0 = 25^\circ\text{C}$ e $P_0 = 101,33 \text{ kPa}$ para a parte física e a $T_0 = 25^\circ\text{C}$ e $P_0 = 99,31 \text{ kPa}$ para parte química.

É importante identificar qual é o ponto inicial do processo, ou seja, o ponto de partida para a eficiência exergética e a exergia consumida nas etapas que fazem parte da fronteira do sistema.

Os Domínios 1 e 2 foram avaliados separadamente com o propósito de entender o biogás como o início do processo. No Domínio 1, o biogás sai como um produto e o RSU não é considerado como um fluxo de exergia. No Domínio 2 o biogás entra como combustível, sendo a eletricidade gerada, o produto. A análise exergética foi focada no Domínio 2 por ser o biogás o fluxo de exergia fonte que é gerado no Domínio 1 e entra no Domínio 2. No primeiro são considerados os consumos de exergia.

Neste estudo a exergia do biogás úmido que é coletado no aterro sanitário e entra no processo de tratamento foi proposta como a fonte de exergia. A exergia do biogás foi calculada como:

$$\dot{E}_{\text{fonte}} = e_{\text{comb}}^{ch} \dot{m}_{\text{comb}} \quad (3)$$

onde \dot{m}_{comb} é o fluxo mássico do biogás seco e e_{comb}^{ch} é a exergia química específica, calculada a partir da composição do biogás como na Eq. (4). (SZARGUT; MORRIS; STEWARD, 1988):

$$e_{comb}^{ch} = \frac{\sum x_k \bar{e}_k^{ch} + \bar{R} T_0 \sum x_k \ln x_k}{M} \quad (4)$$

onde x_k é a fração molar de cada gás que compõe o biogás, \bar{e}_k^{ch} é a exergia química por mol do componente k , \bar{R} é a constante universal dos gases, T_0 é a temperatura de referência e M é a massa molecular calculada para o biogás com um valor de 28,51 kg/kmol. O cálculo de e_{comb}^{ch} é mostrado no Apêndice A.

Na Tab. 6 é mostrada a composição molar do biogás determinada nas análises. A informação da fração molar de metano no biogás coletado no aterro foi fornecida pela empresa Biogás e Energia S.A. Os outros componentes foram obtidos a partir de composições típicas de biogás de aterro encontradas na literatura (GANDOLLA; ACAIA; FISCHER, 1997).

Tabela 6 - Composição do biogás do aterro sanitário de Canhanduba.

Componente	Fração molar do biogás (mol/mol _{mis})
CH ₄	0,52
CO ₂	0,42
N ₂	0,048
O ₂	0,01
CO	0,001
H ₂	0,001

Para obter o fluxo de exergia do biogás \dot{E}_{fonte} , a densidade do biogás foi calculada usando a equação de estado, considerando o biogás como um gás ideal. De acordo com os cálculos, as exergias químicas do biogás seco e úmido resultam praticamente nos mesmos valores.

Para resolver o problema, as seguintes hipóteses simplificativas foram consideradas:

- O diesel e o GLP são levados à mesma base da energia elétrica gerada no motogerador. Para isso, foi considerado que essas fontes exergéticas são utilizadas por uma máquina térmica

hipotética com eficiência térmica equivalente à eficiência do motor gerador $\eta_{II, motor\ gerador}$ (Ver Fig. 16 e 17). Neste sentido, a exergia equivalente para a j^{th} fonte foi calculada como:

$$\dot{E}_{eq-j} = PCI_j \dot{m}_j \eta_{eq} \quad (5)$$

- A energia elétrica usada nas etapas consideradas pelas fronteiras do Domínio 2 e o sistema completo, foi considerada como parte da eletricidade gerada no motor gerador (ver Fig. 16 e 17).

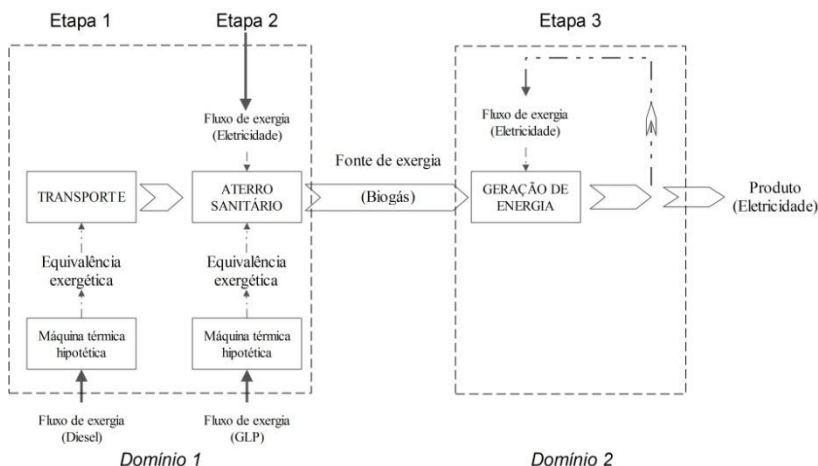


Figura 15 - Fluxos de exergia dos Domínios 1 e 2.

- A vazão do lixiviado gerado no aterro sanitário é de 221 m³/dia; portanto o fluxo de exergia associada ao lixiviado foi considerado insignificante comparado com o fluxo de exergia do biogás.

A primeira hipótese, também considerada por Restrepo (2012), foi considerada para os fluxos de exergia diferentes de eletricidade, com a finalidade de levar eles ao mesmo nível da eletricidade.

Na análise do Domínio 1, os consumos de exergia correspondem à eletricidade consumida nos processos do aterro sanitário, o diesel e o GLP utilizado no tratamento dos resíduos sólidos de serviços de saúde.

Na análise do Domínio 2, o único consumo de exergia considerado é o do biogás que entra no processo de tratamento porque a eletricidade utilizada no tratamento é descontada da eletricidade produzida no motogerador.

Quando são considerados os consumos do sistema completo, mostrado na Fig. 17, incluindo as três etapas, os únicos consumos são devidos ao diesel e ao GLP. O biogás gerado no aterro sanitário não é um fluxo que atravessa a fronteira deste sistema, por isso na análise do sistema completo não é considerado como consumo de exergia. A eletricidade utilizada nas etapas 2 e 3 também não é considerada como consumo de exergia, sendo descontada da eletricidade produzida no motogerador.

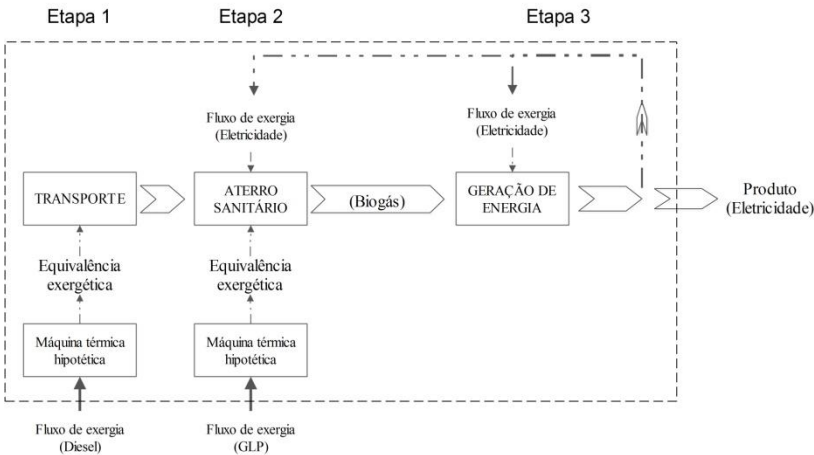


Figura 167 - Fluxos de exergia do sistema completo.

Na análise exergética, os principais parâmetros considerados são os seguintes: A exergia total consumida ($\dot{E}_{total,C}$), a fração de exergia consumida em cada etapa ($f_{C,j}$), as perdas de exergia no motogerador ($\dot{E}_{perdida\ motogerador}$), a eficiência exergética do Domínio 2

$(\eta_{II,Domínio\ 2})$, e a eficiência exergética do motogerador $(\eta_{II,motogerador})$.

A exergia total consumida é calculada de acordo com a Eq. (6):

$$\dot{E}_{total,C} = \sum_{j=1}^n \dot{E}_{C,j} \quad (6)$$

A fração de exergia consumida em cada etapa foi calculada a partir da Eq. (7):

$$f_{C,j} = \frac{\dot{E}_{C,j}}{\dot{E}_{total,C}} \quad (7)$$

As perdas de exergia e eficiência associadas ao motogerador foram calculadas seguindo orientação estabelecida por Bejan et al. (1996). No caso em estudo tem-se:

$$W = \dot{E}_{fonte} - \dot{E}_{d,m} - \dot{E}_g \quad (8)$$

onde \dot{E}_d é a exergia destruída no motogerador e \dot{E}_p é a exergia perdida nos gases de escape. Por simplicidade, neste trabalho foi considerada a soma $\dot{E}_{d,m} + \dot{E}_{p,g}$ como a exergia total destruída no motogerador.

$$\dot{E}_d = \dot{E}_{d,m} + \dot{E}_g \quad (9)$$

A eficiência exergética do motogerador é calculada como:

$$\eta_{II,motogerador} = \frac{\dot{W}_e}{\dot{E}_{fonte}} \quad (10)$$

onde \dot{W}_e é a potência elétrica produzida pelo motogerador.

A eficiência exergética do Domínio 2 é calculada de acordo com a Eq. (11), como a relação entre a eletricidade que sai do Domínio 2 e o fluxo de exergia do biogás que entra no Domínio 2 como combustível:

$$\eta_{II, Domínio\ 2} = \frac{\dot{W}_e - \dot{E}_{Domínio\ 2,C}}{\dot{E}_{fonte}} \quad (11)$$

onde \dot{E}_{fonte} corresponde ao fluxo de exergia do biogás úmido dado pela Eq. (3), \dot{W}_e é a energia elétrica efetiva produzida pelo motogerador e $\dot{E}_{Domínio\ 2,C}$ é a eletricidade consumida no tratamento do biogás. A partir desta análise geral, são definidos os fluxos de exergia e impactos ambientais associados a cada etapa.

4.2 MODELO DA ANÁLISE AMBIENTAL

Na análise ambiental foi considerado o domínio do sistema completo mostrado na Fig. 13, onde são avaliadas as etapas 1, 2 e 3. Os impactos da Etapa 1 correspondem ao consumo de diesel e emissões dos caminhões que transportam o RSU. Na Etapa 2 o impacto corresponde às fugas de biogás que ocorrem no aterro sanitário. Finalmente na Etapa 3 o impacto corresponde às emissões do motogerador.

Levando em conta que sistemas termelétricos de conversão de energia geram uma grande preocupação relacionada ao aquecimento global, a categoria de impacto considerada foi a mudança climática de acordo com os parâmetros do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).

Existem vários métodos de avaliação do impacto ambiental. A análise ambiental do caso estudado foi realizada usando a metodologia de análise de ciclo de vida para considerar os impactos ambientais associados aos processos a montante do processo de geração de eletricidade no motogerador, que estão dentro do domínio do problema. É importante construir o modelo correspondente com as características do sistema. Normalmente é necessário considerar algumas simplificações e hipóteses. Para o caso de estudo foram consideradas as seguintes hipóteses:

- Não existe impacto devido ao uso de eletricidade no aterro sanitário e no tratamento do biogás mesmo que essa eletricidade seja tomada da rede da região. A eletricidade consumida nestes processos é descontada da eletricidade fornecida pelo motogerador, como foi considerado no modelo da análise exergética.

- Considerando que a categoria de impacto avaliada é a de impacto climático, os fluxos tais como os de lixiviados e insumos foram considerados sem impacto ambiental. Esta hipótese é válida para o caso de estudo porque não há uma participação significativa das emissões de GEE devido a esses fluxos (XING et al., 2013). O impacto dos lixiviados é importante quando são avaliadas outras categorias de impacto. A eletricidade utilizada no tratamento dos lixiviados está inclusa na eletricidade utilizada no aterro sanitário.
- Não foi considerado o impacto devido à infraestrutura.
- O impacto ambiental devido à existência do RSU cruzando a fronteira do Domínio 1 não foi considerado. O único impacto associado ao RSU é devido ao transporte dele desde os centros urbanos até o aterro sanitário.

A análise ambiental foi realizada seguindo as quatro fases da metodologia de análise de ciclo de vida, que consiste em:

- 1) Definição do escopo e objetivos;
- 2) Análise de inventário de ciclo de vida;
- 3) Avaliação do impacto de ciclo de vida; e
- 4) Interpretação.

Na primeira fase são definidos o escopo e o objetivo da ACV. O objetivo é determinar o impacto ambiental, relacionado à categoria de impacto mudança climática e calculado mediante o método de ACV, da geração de eletricidade a partir de biogás gerado no aterro sanitário. São considerados os processos de obtenção do biogás, tratamento do biogás e motorizador para quantificar a contribuição de cada uma das etapas definidas na fronteira.

A unidade funcional proposta foi 1 MWh. A unidade funcional deve corresponder ao produto do processo que neste trabalho corresponde à energia fornecida à rede elétrica.

Na segunda fase, o inventário do ciclo de vida foi realizado considerando as fronteiras do sistema correspondentes aos valores de energia, massa e emissões. Aqui é utilizada a informação coletada e mostrada no Capítulo 3 e são estimados os indicadores que relacionam os fluxos de entrada e saída com a unidade funcional, isto é, os valores correspondentes de cada um dos fluxos necessários para fornecer 1 MWh de eletricidade à rede elétrica.

Na terceira fase é avaliado o impacto do ciclo de vida. Aqui foi necessário definir a categoria de impacto a ser avaliada. Considerando a natureza do processo de geração de energia, a categoria de impacto avaliada foi a de mudança climática em que o fator de caracterização correspondente é o IPCC Global Warming Potential (GWP), avaliado para um período de tempo de 100 anos. O GWP é um fator de caracterização que converte o impacto de um gás em base ao impacto gerado pelo CO₂. Assim, para 100 anos o GWP tem um valor de 1 para o CO₂ e de 25 para o CH₄ (IPCC, 2007). O Resultado é obtido em unidades de kg de CO₂-eq por unidade funcional.

A avaliação foi realizada a partir da informação do inventário de ciclo de vida como dados de entrada. Para calcular o impacto ambiental associado a 1 MWh que é a unidade funcional, foi utilizado o software SimaPro 8.0.3. Este software é amplamente usado para avaliar o impacto ambiental relacionado a produtos e processos, contando com a base de dados de *Ecoinvent*, que conta contém uma estendida informação de processos. A partir desta base de dados foram estimados alguns dos parâmetros apresentados no ICV.

Finalmente, na quarta fase, é realizada a interpretação dos resultados. Aqui são apresentados e interpretados os resultados do modelo da análise ambiental de acordo com o objetivo e escopo do estudo. Também foi incluída uma análise de sensibilidade em relação às questões significativas, isto é, aos dados do inventário.

5 RESULTADOS

A partir dos indicadores obtidos e dos modelos explicados no Capítulo 4, são apresentados os resultados da análise exergética e ambiental de forma individual. Seguindo a estrutura metodológica, neste capítulo são apresentados e analisados os resultados, correspondendo à última parte do Passo 2 para cada análise e o Passo 3 da estrutura metodológica.

5.1 ANÁLISE EXERGÉTICA

Embora a análise exergética esteja focada no Domínio 2, os consumos exergéticos são calculados também para o Domínio 1 e o sistema completo. O memorial de cálculos é mostrado em detalhe no Apêndice C. Como foi dito anteriormente, os consumos de exergia a montante do processo de tratamento do biogás correspondem à terça parte do total porque a capacidade de produção de biogás no aterro é três vezes maior que o biogás queimado no motogerador.

5.1.1 Domínio 1:

Os consumos de exergia correspondentes ao Domínio 1 são a eletricidade consumida nos processos do aterro sanitário, o diesel e o GLP.

O consumo exergético do diesel utilizado nos caminhões para transportar o RSU correspondente à produção de biogás utilizado no motogerador analisado é 52,7 kW. Aqui foi implementada a equivalência exergética dada na Eq (5).

Segundo informações fornecidas pela empresa responsável das operações do aterro sanitário, a média mensal de energia elétrica consumida no aterro no ano de 2013 foi de 45,154 MWh/mês. Essa eletricidade corresponde a uma potência média de 61,86 kWe. O correspondente ao biogás queimado no motogerador, que é a terça parte, é de 20,6 kWe.

O consumo exergético do GLP foi calculado a partir do consumo mensal. A vazão média mássica de diesel consumido foi calculada como sendo $4,37 \cdot 10^{-4}$ kg/s. A partir do valor do poder calorífico de GLP, correspondente a 46.090 kJ/kg foi calculado um consumo exergético de 2,3 kW. Aqui também foi implementada a equivalência exergética dada na Eq (5).

Na Tab. 7 são apresentados os consumos de exergia correspondentes ao Domínio 1:

Tabela 7 - Consumos de exergia do Domínio 1.

Fluxo	Consumo (kW)
Diesel	52,7
Energia elétrica aterro sanitário	20,6
GLP	2,3
Total	75,6

5.1.2 Domínio 2:

Como é observado na Fig. 15, o consumo de exergia correspondente ao Domínio 2 é devido unicamente ao biogás que entra no processo de tratamento. Os cálculos do consumo exergético do biogás são apresentados no Apêndice A, sendo 2.367 kW. A eletricidade utilizada no processo de tratamento é de 45 kWe, e não é considerada como fluxo de exergia consumido no Domínio 2, segundo as hipóteses consideradas no modelo da análise exergética. A potência elétrica calculada que sai do Domínio 2 é 757 kWe e a eficiência exergética do Domínio 2 é de 0,32.

O motogerador foi analisado como um processo compacto como é mostrado, onde o combustível é a exergia do biogás e o produto é a eletricidade fornecida. Na Fig. 18 estão representadas as perdas de exergia pelas paredes do gerador e aquelas associadas aos gases de exaustão. A exergia destruída contabiliza a exergia destruída no motogerador por irreversibilidades e a exergia transferida para o meio ambiente em forma de calor dissipado pelo motogerador.

Não há reaproveitamento da exergia associada aos gases de exaustão, de modo que ao final do processo, embora foi entendida como perdida, de fato ela também pode ser entendida como exergia destruída.

Nas condições consideradas o motogerador fornece 802 kWe e consome 2367 kW do biogás, o que corresponde a 435 Nm³/h. A eficiência exergética do motogerador foi calculada como a relação entre a potência fornecida pelo motogerador e a exergia química do biogás (Eq. (10)). O valor obtido da eficiência exergética do motogerador foi de

0,339. A Exergia dos gases de escape foi de 497 kWe. Os cálculos correspondentes são mostrados no Apêndice B.



Figura 178 – Fluxos de entradas e saídas de exergia consideradas para o motogerador.

A Fig. 19 mostra os resultados da análise de sensibilidade da eficiência exergética do motogerador como parâmetro indicado, pelo fato de estar diretamente relacionada à eletricidade fornecida pelo motogerador e à exergia destruída no motogerador. Na análise foi considerado como constante o consumo de biogás. A partir do comportamento linear é possível perceber que com o aumento da eficiência exergética do motogerador, a eletricidade fornecida pelo motogerador aumenta a uma taxa equivalente à taxa de diminuição da exergia destruída no motogerador. A exergia dos gases de exaustão permanece constante, pois depende do combustível consumido.

5.1.3 Sistema completo:

Quando é analisado o sistema completo, que é mostrado na Fig. 13, os consumos de exergia correspondem ao diesel e ao GLP, que já foram calculados para o Domínio 1. Os consumos são mostrados na Tab. 8.

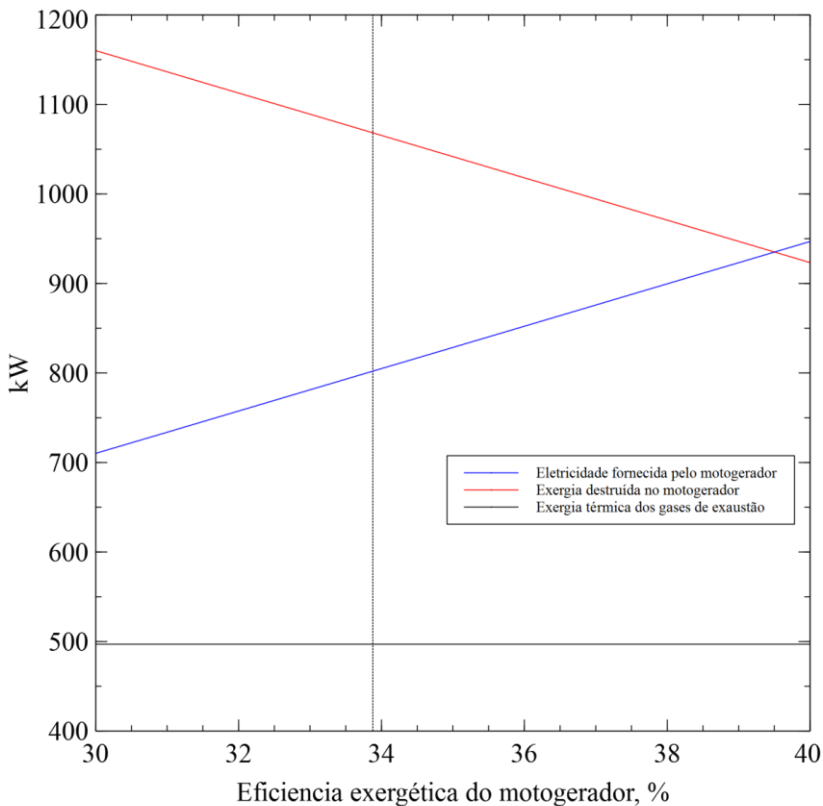


Figura 18 - Influência da eficiência exergética do motogerador na eletricidade produzida, exergia destruída no motogerador e exergia associada aos gases de exaustão.

Tabela 8 - Consumos de exergia do sistema completo.

Fluxo	Consumo (kW)
Diesel	52,7
GLP	2,3
Total	55

No caso para potência gerada de 802 kWe, apenas 735 kWe foram exportados para a rede. A diferença correspondente é de 107 kWe, dos quais 20,6 kWe foram utilizados nas bombas de lixiviados, iluminação e serviços auxiliares.

A partir da definição das três etapas do sistema e dos consumos exergéticos do sistema completo, são calculadas as frações dos consumos de exergia por etapa de acordo com a Eq (7). A Tab. 9 mostra a fração de exergia consumida para cada etapa do sistema. Para os fluxos de exergia considerados, a exergia consumida para o sistema completo é de 55 kW. 95,8% (53 kW) do consumo total corresponde ao consumo de diesel e 4,2% (2,3 kW) é devido ao consumo de GLP. Quando o sistema completo é analisado, a Etapa 3 não contribui ao consumo de exergia porque o biogás é considerado como produzido dentro do sistema.

Tabela 9 - Fração de exergia consumida por etapa.

Etapa	Exergia consumida (kW)	Porcentagem
1: Transporte	53	95,8
2: Aterro sanitário	2,3	4,2
3: Geração de energia	0	0

O cálculo das perdas de exergia no Domínio 2 foi de 1.113 kW e foi calculada descontando a eletricidade que sai do domínio e a exergia dos gases de exaustão da exergia química do biogás.

O motogerador é responsável pela destruição de 1.068 kW de exergia e nos gases de exaustão perdem-se 497 kW. A exergia do diesel e da eletricidade utilizada no aterro sanitário e no tratamento é relativamente baixa somando 265 kW. A Fig. 20 mostra o diagrama de Sankey envolvendo a exergia destruída e os fluxos de exergia em relação às etapas definidas pela fronteira. Cabe lembrar que, conforme indicado no modelo da análise exergética, o biogás é definido como o início do processo. A taxa de 2.367 kW corresponde à exergia associada ao biogás utilizado na planta para produzir a potência elétrica de 802 kWe. Evidentemente os valores apresentados na Fig. 20 poderão variar dependendo da potência entregue pelo motogerador. No caso para a condição analisada, observa-se uma potência líquida de 682 kWe, descontando-se inclusive a eletricidade equivalente pelo diesel consumido no transporte do RSU dos centros urbanos até o aterro

sanitário e do GLP utilizado no tratamento do resíduo sólido de serviços de saúde.

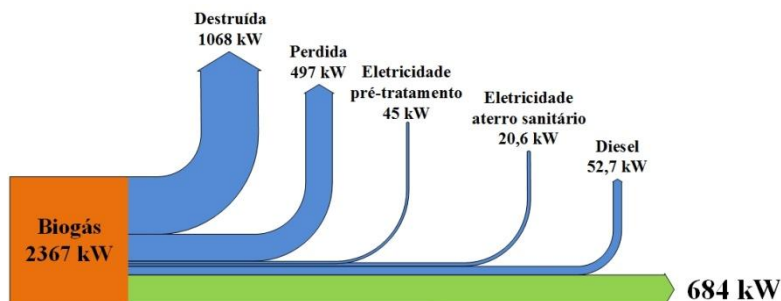


Figura 19 - Diagrama de Sankey contabilizado a exergia destruída e os fluxos de exergia.

5.2 ANÁLISE AMBIENTAL

Aqui são realizadas a segunda, terceira e quarta fase da análise ambiental. A primeira fase foi realizada na apresentação do modelo da análise ambiental no Capítulo 4.

O inventário do ciclo de vida foi realizado considerando o inventário apresentado no final do Capítulo 3. Os indicadores são calculados relacionando os fluxos de entrada e saída com a unidade funcional selecionada de 1 MWh de eletricidade fornecida à rede elétrica.

A média da vazão do biogás que entra no motogerador é de 435 Nm³/h. Com esse gás o motogerador fornece uma potência de 802 kWe, sendo que a máxima potência que o motogerador pode fornecer é de 1.060 kWe. A partir daqui é calculada a quantidade de biogás necessária para que o motogerador forneça 1 MWh que corresponde à unidade funcional.

Considerando 24 horas por dia e em média 30 dias por mês, a energia gerada pelo motogerador corresponde a 585,5 MWh/mês e um consumo de 317.550 Nm³/mês ou ainda 542,4 Nm³/MWh. São todos dados necessários para simulação do impacto ambiental correspondente utilizando a ferramenta computacional SimaPro 8.0.3.

Segundo informações fornecidas pela empresa Ambiental, a média mensal de energia elétrica consumida no aterro no ano de 2013

foi de 45,154 $MWh/mês$. Essa eletricidade corresponde a uma potência média de:

$$45,154 \frac{MWh}{mês} \cdot 12 \frac{mês}{ano} \cdot \frac{1}{365} \frac{ano}{dia} \cdot \frac{1}{24} \frac{dia}{h} \cdot 1000 \frac{kW}{MW} \cdot \frac{1}{3} = 20,62 \text{ kW}$$

A empresa responsável das operações da etapa de geração de energia informou que a potência consumida nesta etapa é 45 kWe. Deste total 27 kWe correspondem ao resfriador, 9 kWe ao compressor e os outros 9 kWe aos outros equipamentos utilizados na planta. A energia média consumida por mês foi calculada como:

$$45 \text{ kW} \cdot \frac{1 \text{ MW}}{1000 \text{ kW}} \cdot 24 \frac{h}{dia} \cdot 365 \frac{dia}{ano} \cdot \frac{1}{12} \frac{ano}{mês} = 32,85 \frac{MWh}{mês}$$

Quando é calculada a eletricidade fornecida à rede elétrica deve ser descontada a eletricidade consumida nas etapas 2 e 3. Tem-se assim:

$$(585,46 - 15,05 - 32,85) \frac{MWh}{mês} = 537,56 \frac{MWh}{mês}$$

E a potência média fornecida à rede é:

$$802 \text{ kWe} - 20,6 \text{ kWe} - 45 \text{ kWe} = 736,4 \text{ kWe}$$

No Apêndice D são calculados os indicadores ambientais correspondentes a cada fluxo de massa, energia e emissões para fornecer 1 MWh de energia à rede elétrica. A partir deles foi realizado o inventário do ciclo de vida.

As entradas identificadas correspondem ao transporte do RSU em caminhões e ao diesel utilizado no transporte. Os indicadores da eletricidade consumida na Etapa 2 e na Etapa 3 são calculados para serem descontados da eletricidade fornecida pelo motogerador. As emissões ao ar identificadas correspondem às fugas do biogás no aterro sanitário e às emissões do motogerador.

A partir dos indicadores é apresentado um resumo do inventário do ciclo de vida, correspondente a 1 MWh de energia fornecida à rede elétrica, considerado como a unidade funcional:

Tabela 10 - Inventário do ciclo de vida para geração de 1 MWh.

Entradas	Quantidade	Unidade
Transporte por caminhão	289,59	ton-km
Diesel	19,29	kg
Saídas		
<i>Emissões ao ar</i>		
Fugas CH ₄	172,98	kg
Fugas CO ₂	77,74	kg
Emissões de CO ₂ de Motogerador	1157	kg

Os indicadores correspondentes à eletricidade consumida na Etapa 2 e na Etapa 3 foram calculados para saber quantos MWh são utilizados nas etapas 2 e 3 por cada MWh fornecido à rede. Esses indicadores não foram incluídos na Tab. 10 porque foram descontados da potência fornecida no cálculo dos indicadores.

O impacto ambiental devido aos fluxos de processos tais como diesel e transporte por caminhão associados à categoria de impacto mudança climática, foram tomados de processos similares na base de dados de *Ecoinvent* utilizando o software SimaPro 8.0.3.

O impacto ambiental total do sistema foi obtido somando os impactos diretos e indiretos. Os impactos diretos correspondem aos impactos associados à operação do motogerador e os indiretos correspondem ao uso de fontes de exergia externas a montante do motogerador, que são as etapas 1 e 2 e o processo de tratamento.

Finalmente, na quarta fase, é realizada a interpretação dos resultados. O modelo da análise ambiental trabalhado deu como resultado emissões de 3.287 kg CO_{2-eq} por cada MWh fornecido à rede elétrica, dos quais 2.112 kg CO_{2-eq} são associados às fugas de biogás no aterro sanitário e 1.093 kg CO_{2-eq} são associados ao motogerador. Como é mostrado na Tab. 11, a Etapa 2 responde por 64,25% do total de CO_{2-eq}, seguido pela Etapa 3 com 33,25%. A Etapa 1 corresponde por 2,50%.

Alguns estudos têm sido realizados com referência às emissões de GEE de sistemas de conversão de energia a partir do biogás de aterro sanitário. (BERLO; WAART, 2008) realizam uma ACV para diferentes sistemas de conversão de eletricidade a partir do RSU. Comparando a produção de eletricidade em aterro sanitário e tomando o caso de referencia a deposição do RSU em aterros controlados, em média na Alemanha são evitados 33 kg CO₂/ton de RSU coletado.

Tabela 11 - Impacto ambiental por etapa na categoria de mudança climática.

Etapa	Impacto (kg CO₂-eq)	Porcentagem
1: Transporte	82	2,50
2: Aterro sanitário	2.112	64,25
3: Geração de energia	1.093	33,25

Para melhorar o processo pode ser considerado o aproveitamento do potencial exergético dos gases de exaustão para, por exemplo, ser utilizado no tratamento dos resíduos sólidos de serviços de saúde ou para ser utilizado no sistema de resfriamento do biogás, reempazando o GLP ou a energia elétrica. A quantidade de eletricidade produzida poderia aumentar usando também os gases de exaustão; esses gases podem ser levados a um sistema de ciclo Rankine orgânico, onde aquecem um fluido orgânico que é expandido posteriormente para gerar eletricidade. Estas melhoras no processo implicariam em benefícios tanto desde o aspecto exergético como desde o ambiental.

A última etapa a ser implementada no domínio da análise foi a Etapa 3 de geração de energia. Antes da instalação da Etapa 3, o impacto ambiental correspondia ao transporte do RSU, fugas de biogás no aterro sanitário, queima direta do biogás coletado e a eletricidade consumida no aterro, pois essa eletricidade não era descontada devido a que não existia geração de energia. Considerando que o impacto devido às emissões por queima direta do biogás coletado no aterro é equivalente ao impacto das emissões dos gases de exaustão do motorizador, o impacto ambiental com geração de energia seria o mesmo do que o impacto sem geração de energia. Isto quer dizer que a implementação da Etapa 3, não implica aumento do impacto ambiental considerando as mesmas hipóteses para ambos os casos.

O impacto ambiental parece ser alto comparado com outros sistemas de conversão de energia. Para a fronteira estendida da análise foram consideradas a Etapa 1 e a Etapa 2, além da Etapa 3, que são processos que devem acontecer para o funcionamento de um aterro sanitário, independentemente da existência do processo de geração de energia.

Na Fig. 21 são mostrados os resultados da análise de sensibilidade considerando a porcentagem de fugas de biogás no aterro sanitário como parâmetro. É observado o comportamento linear do

aumento do impacto ambiental devido ao aumento da porcentagem de fuga de biogás. A diferença entre as duas curvas representa o impacto ambiental das etapas 1 e 3 e não depende da porcentagem de fugas. Considerando 0% de fugas de biogás, o impacto ambiental é de 1.239 kg CO_{2-eq}/MWh devido, principalmente, às emissões do motogerador. É importante ressaltar para o caso em estudo que as fugas respondem pelo impacto equivalente a 2.112 kg CO_{2-eq}/MWh de um total de 3287 kg CO_{2-eq}/MWh do sistema completo.

Na Fig. 22 são relacionados os resultados da análise exergética com a análise ambiental, com uma análise de sensibilidade onde é mostrada a influência da eficiência exergética do motogerador no impacto ambiental total do sistema completo. A eficiência térmica do motogerador analisado é de 33,9% e corresponde a um impacto de 3287 kg CO_{2-eq}/MWh. Para uma eficiência exergética do motogerador de 40%, o impacto ambiental se reduz a 2.773 kg CO_{2-eq}/MWh.

Restrepo (2012) faz a análise ambiental na categoria mudança climática obtendo as emissões de GEE da geração de eletricidade comparando dois casos: (i) 100% carvão e (ii) combustão combinada de 90% carvão e 10% biomassa. O autor considera os processos de obtenção dos combustíveis, transporte, processamento dos combustíveis e o ciclo térmico. Para o caso de 100% carvão o impacto ambiental foi de 1.230 kg CO_{2-eq}/MWh correspondendo 91,0% às emissões do ciclo térmico. No caso de combustão combinada o impacto foi de 1.253 kg CO_{2-eq}/MWh, correspondendo 90,9 % às emissões do ciclo térmico.

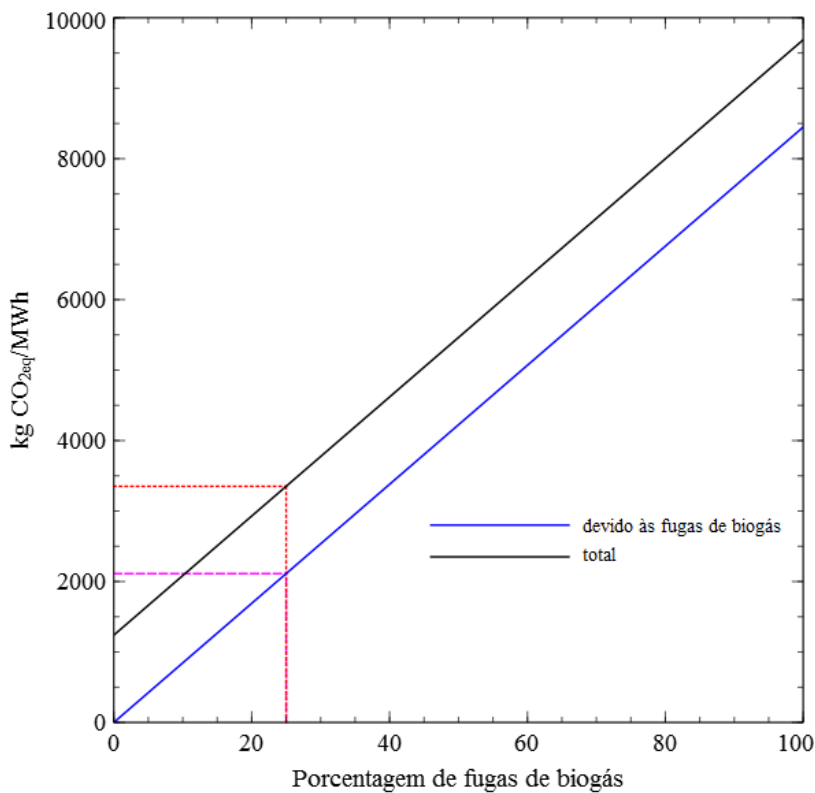


Figura 21 - Influência da porcentagem de fugas de biogás no impacto ambiental total e devido às fugas.

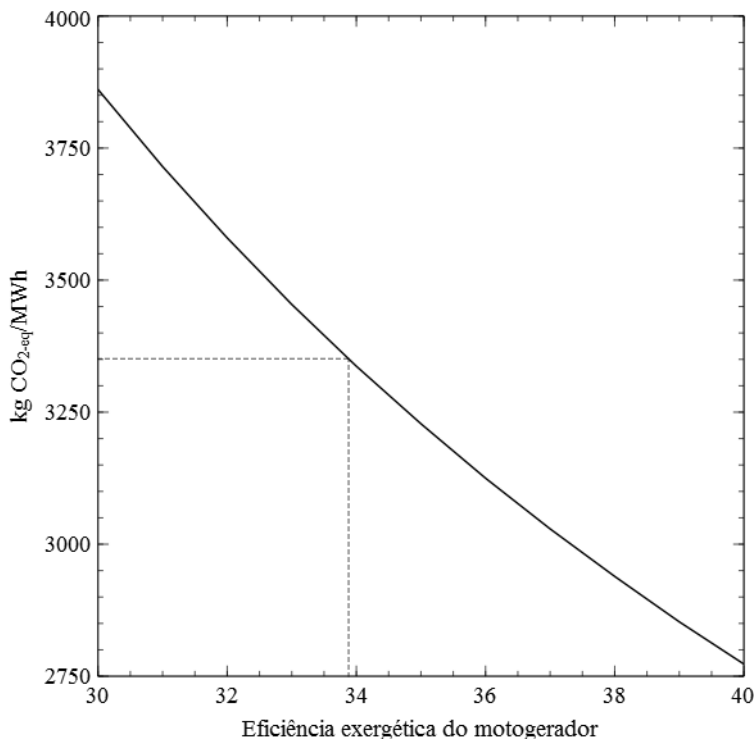


Figura 22 - Influência da eficiência exergética do motogerador no impacto ambiental.

5.2 PROPOSTAS ALTERNATIVAS PARA USO RACIONAL DO BIOGÁS

5.3.1 Cenário 1: *Chiller* de absorção

Aqui foi proposto o aproveitamento do calor dos gases de exaustão para o resfriamento do biogás na planta de tratamento substituindo o *chiller* mecânico por um *chiller* de absorção. Foi considerado que a través de um fluido térmico é transferido o calor destes gases ao *chiller* de absorção que é utilizado para resfriar a água que posteriormente resfria o biogás. Na fig. 23 é mostrado o esquema representativo da proposta alternativa.

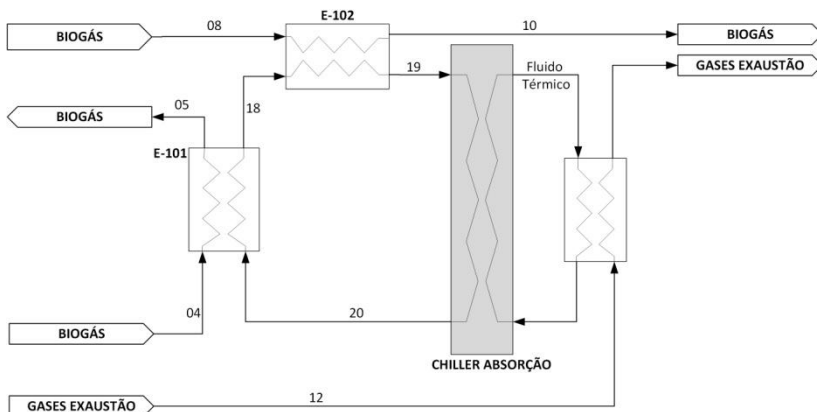


Figura 20 - Esquema da proposta alternativa de substituição do *chiller* mecânico por um *chiller* de absorção.

Os gases de exaustão saem do motor a uma temperatura de 600 °C e o fluido térmico transfere o calor ao *chiller* a uma temperatura considerada de 200 °C. A vazão de biogás foi de 0,1537 kg/s. Considerando o COP do *chiller* de absorção de 0,9 e a eficiência na transferência do calor dos gases de exaustão ao fluido térmico de 1, foi calculada uma vazão da água de resfriamento de 0,24 kg/s saindo do *chiller* com uma temperatura de 0 °C e entrando a 14,4 °C. Os seguintes resultados foram encontrados:

Tabela 12 - Parâmetros atualizados ao substituir o *chiller* mecânico por um *chiller* de absorção.

Parâmetro	
η II, Domínio 2	0,33
Emissões do motogerador	1.040 kg CO _{2-eq} /MWh
Impacto Ambiental total	3.234 kg CO _{2-eq} /MWh

A eficiência do Domínio 2 aumenta 1% devido a que o consumo de eletricidade na planta de tratamento passa de 54 a 27 kW. A exergia utilizada para resfriar o biogás é tomada dos gases de exaustão que no caso estudado, ou de referência, foi considerada perdida para a atmosfera. Neste cenário, a potência que sai do sistema completo aumenta de 757 kW para 784 kW, diminuindo o impacto ambiental de

1.093 para 1.040 kg CO_{2-eq}/MWh no motogerador e de 3.287 para 3.234 kg CO_{2-eq}/MWh no sistema completo. De fato são diferenças pequenas tendo em vista que do total de 497 kW disponíveis nos gases de exaustão, apenas 16 kW são utilizados para resfriar o biogás. Observa-se ainda um grande potencial de aproveitamento.

5.3.2 Cenário 2: Caldeira a biogás

Neste cenário, o biogás, inicialmente queimado no *flare*, passa a ser considerado como a fonte exergética para a caldeira, economizando GLP. Na Fig. 24 é mostrado o esquema representativo da proposta alternativa. Ao evitar o consumo de GLP há evidentemente uma redução do impacto ambiental, que no caso de estudo não apresenta diferenças relevantes, se comparado ao impacto devido às fugas de biogás. De acordo com recomendações estabelecidas para realização da ACV, são desconsiderados os impactos inferiores a 1% do impacto total.

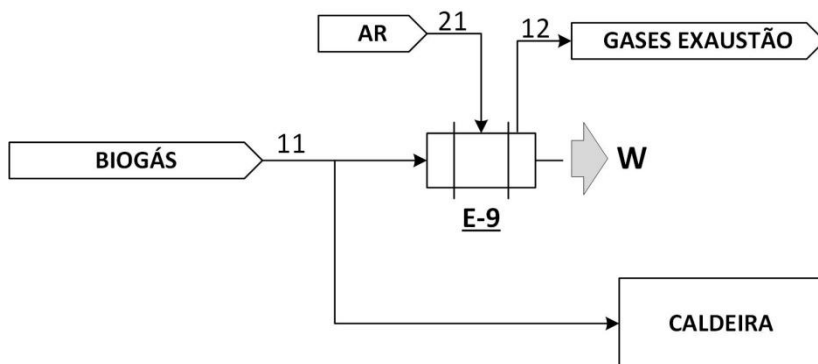


Figura 24 - Esquema da proposta alternativa de substituição do GLP por biogás na caldeira.

Aqui foi considerado que o biogás, que por alguns períodos de tempo é queimado no *flare* da planta de tratamento do biogás, é utilizado no tratamento em autoclave do resíduo sólido do serviço de saúde substituindo o GLP. A eficiência da caldeira utilizando gás natural e GLP é semelhante e equivalente a 0,9. Foi considerado também que a eficiência da caldeira utilizando biogás é a mesma que utilizando gás

natural. Vapor saturado na pressão de 5 bar é considerado para alimentação da autoclave.

A exergia do GLP consumido na caldeira corresponde a 20,14 kW. Para fornecer essa potência são necessários 3,7 Nm³/h do biogás tratado.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram realizadas uma análise exergética e uma análise ambiental baseada na metodologia de análise de ciclo de vida, apresentadas para um caso específico de produção de eletricidade, utilizando um motogerador que usa biogás produzido em aterro sanitário localizado no município de Itajaí – Santa Catarina.

As fronteiras do problema compreendem o transporte do RSU, os processos do aterro sanitário, o tratamento do biogás e o motogerador. Para a análise exergética, dois domínios em particular foram considerados, um primeiro incluindo o transporte e o aterro sanitário (Domínio 1) e o segundo incluindo o tratamento do biogás e o motogerador (Domínio 2). Dentre os resultados obtidos pode-se afirmar que:

- O modelo proposto atende o objetivo de caracterizar o processo de geração de energia desde o ponto de vista exergético e ambiental. O modelo pode ser utilizado para outros sistemas de produção de eletricidade.
- A instalação do motogerador é viável, trazendo benefícios diretos com a eletricidade exportada para a rede e inclusive compensando custos energéticos associados ao transporte do RSU, processamento do aterro sanitário e tratamento do biogás.
- A eficiência exergética do Domínio 2, que inclui o tratamento do biogás e o motogerador, é de 32%. O fluxo de exergia do biogás é 2.367 kW e a exergia da eletricidade que sai do Domínio 2 corresponde a 757 kWe. A exergia dos gases de exaustão é de 497 kW e a exergia restante corresponde à exergia perdida e destruída dentro do motogerador.
- Para fornecer 736 kWe à rede elétrica são requeridos 55 kW do sistema completo, onde 53 kW correspondem ao consumo de diesel. Para o cálculo da exergia consumida, foi suposto que a eletricidade consumida na Etapa 2 e na Etapa 3 foi tomada da eletricidade fornecida pelo motogerador.
- O impacto ambiental, avaliando a categoria de impacto mudança climática, para gerar 1 MWh de eletricidade

considerando o sistema completo é de 3.287 kg CO₂-eq. 64,25% desse impacto é devido às fugas de biogás no aterro sanitário. Foi considerada uma fuga de 25% do total de biogás produzido no aterro sanitário, de acordo com a literatura técnica. O impacto devido às emissões do motogerador é de 33,25%, enquanto que o 2,5% restante corresponde ao transporte do RSU utilizando diesel como combustível.

- A eficiência na coleta do biogás é um parâmetro que influi de forma determinante no impacto ambiental total do sistema analisado quando os processos no aterro sanitário encontram-se dentro do domínio do problema.
- Os resultados das análises realizadas podem ser estendidos para o caso de geração de eletricidade com 2 ou 3 motogeradores na mesma instalação, devido a que os consumos exergéticos e os impactos ambientais de processos a montante da coleta do biogás foram considerados um terço do total. Isto, porque a capacidade de geração de biogás do aterro é três vezes maior que vazão utilizada no motogerador do caso analisado.
- A proposta de utilizar a exergia residual dos gases de exaustão do motogerador como fonte de exergia para resfriamento do biogás através do *chiller* de absorção representa um ganho de relativamente pequeno, na ordem de 27 kW. No caso são utilizados apenas 16 kW de um total de 497 kW disponíveis nos gases de exaustão do motogerador.
- Finalmente para o caso relativo à geração de vapor para tratamento dos resíduos sólidos do resíduo sólido do serviço de saúde. O ganho foi ainda menor, mas com a vantagem de deslocar integralmente o GLP antes queimado na caldeira.

Para trabalhos futuros recomenda-se o estudo do impacto ambiental e a análise exergética considerando três cenários distintos, um primeiro relacionado a aterros controlados sem coleta de biogás, um segundo como aterro sanitário com coleta e queima do biogás e, finalmente, um terceiro compreendendo a geração de eletricidade. Este que foi o objeto do estudo do trabalho.

REFERÊNCIAS

ABNT 10004. Resíduos sólidos: Classificação, 2004.

ABNT 14040. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura, 2009.

ABNT 14044. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações, 2009.

ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. São Paulo: ABRELPE, 2010.

ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. São Paulo: ABRELPE, 2012.

BARLAZ, M. A.; CHANTON, J. P.; GREEN, R. B. Controls on Landfill Gas Collection Efficiency: Instantaneous and Lifetime Performance. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 59, n. 12, p. 1399–1404, dez. 2009.

BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. Thermal Design and Optimization. John Wiley ed. USA: Wiley, 1996.

BERLO, M. A. J. VAN; WAART, H. DE. Unleashing the power in waste: Comparison of Greenhouse gas and other Performance Indicators for Waste-to-Energy concepts and Landfilling, Annual North American Waste-to-Energy Conference, Philadelphia, Estados Unidos, 2008

CENGEL, Y.; BOLES, M. Thermodynamics - An engineering approach. McGraw-Hil ed. [s.l: s.n.]. p. 423

CONESTOGA-ROVERS. Landfill Gas Management Facilities Design Guidelines. Richmond, Canada: British Columbia Ministry of Environment, 2010.

ENVIRONMENTAL AGENCY. Interim internal technical guidance for best practice flaring of landfill gas, 1999.

FRANGOPOULOS, C. A.; CARALIS, Y. C. A method for taking into account environmental impacts in the economic evaluation of energy systems. Elsevier, v. 38, n. 15, p. 1751–1763, 1997.

GANDOLLA, M.; ACAIA, C.; FISCHER, C. Formação, captação e stutamento di biogas in doscariche, Seminario di Aggiornamento, Collana Ambiente. Milão, Italia.: 1997

HAMELINCK, C. N.; SUURS, R. A. A.; FAAIJ, A. P. C. International bioenergy transport costs and energy balance. Biomass and Bioenergy, v. 29, n. 2, p. 114–134, ago. 2005.

IEA. World energy outlook 2012. Paris: IEA Publications, 2012.

IPCC. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter 2 Changes in Atmosferic Constituents and in Radiative Forcing, Oberpffafenhofen, Alemanha, 2007.

ISO/FDIS 14040. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, Saint-Denis, França, 2006.

ISO/FDIS-14044. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, Saint-Denis, França, 2006.

LOMBARDI, L. Life cycle assessment (LCA) and exergetic life cycle assessment (ELCA) of a semi-closed gas turbine cycle with CO₂ chemical absorption. Energy Conversion and Management, v. 42, n. 1, p. 101–114, jan. 2001.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Plano Nacional de Resíduos Sólidos, Brasília, 2011.

PERTL, A; MOSTBAUER, P.; OBERSTEINER, G. Climate balance of biogas upgrading systems. Waste management, v. 30, n. 1, p. 92–9, jan. 2010.

RESTREPO, A. Metodologia de Análise e Avaliação Exergoambiental de Plantas Termoeletricas Operando em Combustão Combinada Carvão-Biomassa. Tese de doutorado, Florianópolis, Brazil: UFSC, 2012.

RODRIGUES DOS SANTOS, C. Gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos: desafios, possibilidades e limitações para implantação no município de Imbituba, SC, Criciúma, Brazil, 2009.

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB. Basic data on biogas Sweden, 2012.

SZARGUT, J.; MORRIS, D. R.; STEWARD, F. R. Exergy analysis of thermal, Chemical, and Metallurgical Process. [s.l.] Hemisphere Publishing Corporation, 1988.

TONINI, D.; ASTRUP, T. LCA of biomass-based energy systems: A case study for Denmark. *Applied Energy*, v. 99, p. 234–246, nov. 2012.

VALENTE, C.; SPINELLI, R.; HILLRING, B. G. LCA of environmental and socio-economic impacts related to wood energy production in alpine conditions: Valle di Fiemme (Italy). *Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 17-18, p. 1931–1938, nov. 2011.

VIANA, F. Análise de viabilidade técnica e econômica da geração de energia através do biogás de lixo em aterros sanitários. Tese de doutorado, Rio de Janeiro: UFRJ, 2009.

WHELESS, E.; PIERCE, J. Siloxanes in Landfill and Digester Gas UpdateSWANA 27th LFG Conference. Long Beach, Estados Unidos, 2004

WORLD BANK. A Global Review of Solid Waste Management Washington, Estados Unidos, 2012.

WORLD BANK - ESMAP. Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and the Caribbean Waterloo, Canadá, 2004.

XING, W. et al. Environmental impact assessment of leachate recirculation in landfill of municipal solid waste by comparing with evaporation and discharge (EASEWASTE). *Waste management*, v. 33, n. 2, p. 382–9, fev. 2013.

XYDIS, G.; NANAKI, E.; KORONEOS, C. Exergy analysis of biogas production from a municipal solid waste landfill. Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 4, p. 20–28, dez. 2013.

APÊNDICE A – Exergia química específica do biogás

A exergia química específica do biogás foi calculada a partir da Eq. (4) e utilizando a composição do biogás mostrada na Tab. 6. A exergia química padrão e a massa molecular de cada componente são mostradas na Tab. A.1 (SZARGUT; MORRIS; STEWARD, 1988).

Tabela A.1 - Exergia química padrão e massa molecular dos componentes do biogás.

Componente	Exergia química padrão (kJ/mol _i)	Massa molecular (kg/kmol _i)
CH ₄	831,65	16
CO ₂	19,87	44
N ₂	0,72	28
O ₂	3,97	32
CO	275,1	28
H ₂	236,1	2

A temperatura de referência considerada foi de 25 °C e a pressão de 101,32 kPa. A exergia específica calculada do biogás foi de 15.400 kJ/kg, que é equivalente ao valor obtido no Svenskt Gastekniskt Center (2012), de 16.000 kJ/kg para biogás de aterro.

Utilizando a Eq. (3) e a vazão de biogás consumida pelo motogerador para as condições indicadas de 435 Nm³/h, é calculada a exergia do biogás, considerada o fluxo de exergia fonte. A densidade do biogás é de 1,27 kg/Nm³.

$$\dot{E}_{fonte} = 15.400 \frac{kJ}{kg} \cdot 435 \frac{Nm^3}{h} \cdot 1,27 \frac{kg}{Nm^3} \cdot \frac{1}{3600} \cdot \frac{h}{s} = 2367 kW$$

APÊNDICE B – Composição e exergia térmica dos gases de exaustão

B.1 COMPOSIÇÃO DOS GASES DE EXAUSTÃO

A composição dos gases de saída foi obtida a partir da composição do biogás mostrada na Tab. 6. Foram consideradas as seguintes hipóteses:

- Excesso de ar de 20%;
- Combustão completa dos gases no motogerador;
- Composição molar do ar de 0,21 de O₂ e 0,79 de N₂ ;
- Os componentes dos gases de exaustão que reagem com o oxigênio do ar são CH₄, CO e H₂.

A composição dos gases de exaustão, considerando o excesso de ar é mostrada na Tab. B.1.

Tabela B.1 - Composição dos gases de exaustão.

Componente	Vazão molar (kmol/h)	Vazão mássica (kg/h)	Fração molar em base úmida	Fração molar em base seca
CO ₂	18,3	804,4	0,141	0,161
N ₂	91,2	2553,8	0,703	0,804
H ₂ O	20,2	364,0	0,156	
O ₂	4,0	128,1	0,031	0,035
TOTAL	129,7	3850,2		

B.2 EXERGIA DOS GASES DE EXAUSTÃO

A exergia térmica dos gases de exaustão foi calculada de acordo com Szargut, Morris e Steward (1988), para gases de exaustão livres de componentes combustíveis, como:

$$\dot{E}_g = \dot{E}(T) + \dot{E}(P) + \dot{E}(y) \quad (12)$$

onde $\dot{E}(T)$ é o componente da exergia dependente da temperatura, $\dot{E}(P)$ é o componente da exergia dependente da pressão e $\dot{E}(y)$ é o componente da exergia dependente da composição.

$\dot{E}(T)$ é avaliado a partir do diagrama de Rant, *apud*. Szargut, Morris e Steward (1988), (SZARGUT; MORRIS; STEWARD, 1988) para uma demanda teórica de ar de 24 kmol/h, vazão molar dos gases de exaustão de 129,7 kmol/h e excesso de ar de 20%. O componente dependente da temperatura calculado foi de 10.400 kJ/kmol.

O componente dependente da pressão $\dot{E}(P)$ é nulo pois é considerado que a pressão parcial dos componentes dos gases de exaustão e a pressão de referência são iguais.

$\dot{E}(y)$ é avaliado a partir da composição dos gases de exaustão mostrada na Tab. B.1 e uma temperatura de referência de 25°C. O componente dependente da composição calculado foi avaliado em 3.394 kJ/kmol.

A partir da vazão molar foi calculada a exergia térmica dos gases como

$$\dot{E}_g = (10.400 + 3.394) \frac{kJ}{kmol} \cdot 129,7 \frac{kmol}{h} \cdot \frac{1}{3600} \cdot \frac{h}{s} = 497 kW$$

APÊNDICE C – Memorial de cálculos: Análise exergética

C.1 DOMÍNIO 1

Os consumos de exergia correspondentes ao Domínio 1 são a eletricidade consumida nos processos do aterro sanitário, o diesel e o GLP.

O consumo exergético do diesel foi calculado a partir do consumo mensal e utilizando uma densidade de 0.85 kg/l. A vazão média mássica de diesel consumido foi calculada como:

$$34.542 \frac{l}{mês} \cdot 0,85 \frac{kg}{l} \cdot 12 \frac{mês}{ano} \cdot \frac{1 ano}{365 dia} \cdot \frac{1 dia}{86.400 s} = 0,0118 \frac{kg}{s}$$

A partir daqui foi utilizada a Eq. (5) para obter o equivalente exergético do consumo de diesel. Sendo o poder calorífico do diesel 41.800 kJ/kg e a eficiência exergética do motogerador 0,34, a equivalência exergética do consumo de diesel é:

$$\dot{E}_{eq-diesel} = 41.800 \frac{kJ}{kg} \cdot 0,0118 \frac{kg}{s} \cdot 0,34 = 158,2 kW$$

O consumo de exergia correspondente à geração de biogás utilizado no motogerador é um terço do total:

$$\dot{E}_{c,diesel} = \frac{158,2 kW}{3} = 52,7 kW$$

Segundo informações fornecidas pela empresa responsável pelas operações do aterro sanitário, a média mensal de energia elétrica consumida no aterro no ano de 2013 foi de 45,154 MWeh/mês. Essa eletricidade corresponde a uma potência média de:

$$45,154 \frac{MWeh}{mês} \cdot 12 \frac{mês}{ano} \cdot \frac{1 ano}{365 dia} \cdot \frac{1 dia}{24 h} \cdot 1000 \frac{kWe}{MWe} = 61,86 kWe$$

A eletricidade média consumida no aterro sanitário é calculada a partir da potência média consumida, como sendo um terço do total:

$$\dot{E}_{c,eletricidade Etapa 2} = \frac{61,86 kWe}{3} = 20,6 kWe$$

O consumo exergético do GLP foi calculado a partir do consumo mensal. A vazão média mássica de diesel consumido foi calculada em kg/s como:

$$1148 \frac{kg}{mês} \cdot 12 \frac{mês}{ano} \cdot \frac{1 ano}{365 dia} \cdot \frac{1 dia}{86.400 s} = 4,37 \times 10^{-4} \frac{kg}{s}$$

A partir daqui foi utilizada a Eq. (5) para obter o equivalente exergético do consumo de GLP. Sendo o poder calorífico do GLP 46.090 kJ/kg e a eficiência exergética do motogerador 0.34, a equivalência exergética do consumo de GLP é:

$$\dot{E}_{GLP} = 46.090 \frac{kJ}{kg} \cdot 4,37 \times 10^{-4} \frac{kg}{s} \cdot 0.34 = 6,92 kW$$

O consumo de exergia correspondente à geração de biogás utilizado no motogerador é um terço do total:

$$\dot{E}_{c,diesel} = \frac{6,92 kW}{3} = 2,3 kW$$

C.1 DOMÍNIO 2

Como é observado na Fig. 15, o consumo de exergia correspondente ao Domínio 2 é devido unicamente ao biogás que entra no processo de tratamento. O consumo exergético do biogás é a exergia química calculada a partir da Eq. (3), sendo 2.367 kW. A eletricidade utilizada no processo de tratamento é de 45 kWe, e não é considerada como fluxo de exergia consumido no Domínio 2.

Para calcular a potência elétrica que sai do Domínio 2, a eletricidade consumida no processo de tratamento é descontada da eletricidade proporcionada pelo motogerador. A eficiência exergética do Domínio 2 é calculada a partir da Eq. (11) como sendo a relação entre a eletricidade que sai do Domínio 2 e a exergia química do biogás. A eletricidade que sai do Domínio 2 é a diferença entre a eletricidade fornecida pelo motogerador e a eletricidade consumida no tratamento do biogás:

$$802 kW_e - 45 kW_e = 757 kW_e$$

e a eficiência exergética do Domínio 2 é:

$$\eta_{II, \text{Domínio 2}} = \frac{757 \text{ kWe}}{2.367 \text{ kWe}} = 0,32$$

C.2.1 Motogerador:

O motogerador foi analisado como um processo compacto como é mostrado na Fig. 18, onde o combustível é a exergia do biogás e o produto é a eletricidade fornecida. As perdas de exergia são a exergia térmica dos gases de exaustão, a exergia destruída no motogerador e o calor perdido dentro do motogerador.

A eficiência exergética do motogerador é a relação entre a potência fornecida pelo motogerador e a exergia química do biogás:

$$\eta_{II, \text{motogerador}} = \frac{802 \text{ kWe}}{2.367 \text{ kWe}} = 0,34$$

A exergia dos gases de escape foi de 497 kWe. Os cálculos correspondentes são mostrados no Apêndice B.

APÊNDICE D – Memorial de cálculos: Análise ambiental

D.1 ENTRADAS IDENTIFICADAS

Transporte do RSU em caminhões: Aqui são contabilizadas as toneladas quilométricas correspondentes ao transporte do RSU desde os municípios até o aterro sanitário. A média da distância total percorrida por mês por todos os caminhões foi de 68.166 km que para gerar um terço do biogás corresponde a

$$\frac{68.166 \frac{km}{mês}}{3} = 22.722 \frac{km}{mês}$$

Para cada MWh fornecido à rede, a distância percorrida corresponde a:

$$\frac{22.722 km/mês}{507,46 MWh/mês} = 44,78 \frac{km}{MWh}$$

Sendo 9.845 t o total de RSU transportados por mês, o correspondente para 44,78 km é:

$$\frac{44,78 km \cdot 9.845 t}{68.166 km} = 6,467 t$$

Assim, é calculado o indicador para cada MWh devido ou transporte como:

$$I_{transporte} = 44,78 \frac{km}{MWh} \cdot 6,467 t = 289,59 \frac{tkm}{MWh}$$

Diesel: Aqui é contabilizado o diesel utilizado pelos caminhões para transportar o RSU. De acordo com o inventário do Capítulo 3, no ano de 2013, em média mensal foi consumido 34.542 l de diesel.

$$\text{Sendo } \rho_{diesel} = 0,85 \frac{kg}{l} \Rightarrow 34.542 \frac{l}{mês} \cdot 0,85 \frac{kg}{l} = 29.360 \frac{kg}{mês}$$

O consumo do diesel correspondente à geração do biogás utilizado pelo motorizador é um terço do total:

$$\frac{29.360 \frac{kg}{mês}}{3} = 9.787 \frac{kg}{mês}$$

Logo, o indicador de consumo de diesel em base a 1 MWh é:

$$I_{diesel} = \frac{9.787 \text{ kg diesel/mês}}{507,46 \text{ MWh/mês}} = 19,29 \frac{\text{kg diesel}}{\text{MWh}}$$

Eletricidade Etapa 2: Tomando como base a média mensal calculada a partir das informações fornecidas pelo aterro sanitário, a energia elétrica consumida por mês correspondente à produção do biogás queimado no motogerador é:

$$\frac{45,154 \text{ MWh/mês}}{3} = 15,05 \text{ MWh/mês}$$

O indicador associado ao consumo de eletricidade correspondente as operações do aterro sanitário em base à unidade funcional é:

$$I_{eletricidade \text{ Etapa } 2} = \frac{15,05 \text{ MWh/mês}}{507,46 \text{ MWh/mês}} = 0,0297 \frac{\text{MWh}}{\text{MWh}}$$

Eletricidade Etapa 3: Tomando como base a média mensal calculada a partir das informações fornecidas pela empresa responsável da etapa de geração de energia, o indicador associado ao consumo de eletricidade nesta etapa é obtido em unidades de energia produzida, devido a que os processos de tratamento de biogás e o motogerador se encontram a jusante da produção de biogás e existem com o fim de fornecer energia à rede:

$$I_{eletricidade \text{ Etapa } 3} = \frac{32,85 \text{ MWh/mês}}{507,46 \text{ MWh/mês}} = 0,065 \frac{\text{MWh}}{\text{MWh}}$$

D.1 EMISSÕES AO AR

Biogás liberado à atmosfera: A partir da composição do biogás mostrada na Tab. 5 são identificados os indicadores correspondentes ao CO₂ e CH₄. Considerando, a partir da literatura técnica (BARLAZ; CHANTON; GREEN, 2009), fugas de 25% do total do biogás produzido no aterro sanitário, é calculado o total de fugas por mês:

$$317.550 \frac{Nm^3}{mês} \cdot \left(\frac{0,25}{0,75} \right) = 105.850 \frac{Nm^3}{mês}$$

Sendo $\rho_{biogás} = 1,272 \text{ kg}/Nm^3$, a massa total das fugas de biogás por mês é:

$$105.850 \frac{Nm^3}{mês} \cdot 1,272 \frac{kg}{Nm^3} = 134.641 \frac{kg}{mês}$$

As frações mássicas correspondentes ao CH_4 e CO_2 são 0,293% e 0,648%. São calculadas assim, as emissões totais por mês dos dois componentes:

$$\dot{m}_{CH_4} = 134.641 \frac{kg_{biogás}}{mês} \cdot 0.293 \frac{kg CH_4}{kg_{biogás}} = 39.383 \frac{kg CH_4}{mês}$$

$$\dot{m}_{CO_2} = 134.641 \frac{kg_{biogás}}{mês} \cdot 0.648 \frac{kg CO_2}{kg_{biogás}} = 87.259 \frac{kg CO_2}{mês}$$

Os indicadores correspondentes para 1 MWh fornecido na rede são:

$$I_{fugas_{CH_4}} = \frac{87.274 \text{ kg } CH_4/mês}{507,46 \text{ MWh}/mês} = 77,61 \frac{kg CH_4}{MWh}$$

$$I_{fugas_{CO_2}} = \frac{39.450 \text{ kg } CO_2/mês}{507,46 \text{ MWh}/mês} = 171,95 \frac{kg CO_2}{MWh}$$

Emissões do motogerador: Foram realizados os cálculos das emissões do motogerador. O cálculo é mostrado detalhadamente no apêndice B. A partir da vazão mássica de CO_2 e a potência fornecida à rede, é calculado o indicador correspondente às emissões de CO_2 do motogerador. A potência fornecida à rede é a potência fornecida pelo motogerador descontando a potência utilizada na Etapa 2 (61,85 kWe) e na Etapa 3 (45 kWe):

$$I_{emissões_{motogerador}} = \frac{804,36 \text{ kg } CO_2/h}{736 \text{ kW}} \cdot 1000 \frac{kW}{MWh} = 1.093 \frac{kg CO_2}{MWh}$$